

**INTEGRATIVE (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN DER (NEURO-)KOGNITION
VOR DEM HINTERGRUND DES (NEO-)KONNEKTIONISMUS,
DER THEORIE DER NICHTLINEAREN DYNAMISCHEN SYSTEME,
DER INFORMATIONSTHEORIE UND DES SELBSTORGANISATIONSPARADIGMAS**

D i s s e r t a t i o n
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Philosophie
in der Philosophischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von

Harald Maurer, geb. Knispel

aus

Schwäbisch Gmünd

2014

**Gedruckt mit Genehmigung der Philosophischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen**

Dekan: Prof. Dr. Jürgen Leonhardt

Hauptberichterstatter: Prof. Dr. Peter Schroeder-Heister

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Martin Bogdan, Prof. Dr. Herbert Keuth

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2014

Universitätsbibliothek Universität Tübingen, Tobias-lib

Vorwort

Das Buch stellt eine leicht überarbeitete Fassung meiner Promotionsarbeit dar, die ich im Fachbereich Philosophie bzw. Wissenschaftstheorie bei Prof. Dr. Peter Schroeder-Heister vom Sommersemester 2007 bis zum Wintersemester 2012/13 geschrieben habe, bei dem ich mich ganz herzlich für die optimale Betreuung bedanken möchte.

Das Buch gibt erstmals einen umfassenden Überblick über eine Vielzahl von kognitiven Neuroarchitekturen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus, die mit ihren integrativen (Synchronisations-)Mechanismen versuchen, das in den kognitiven Neurowissenschaften, vor allem in der medizinischen Neurophysiologie, diskutierte allgemeine Bindungsproblem – sowohl in der Wahrnehmungskognition wie auch in der Sprachkognition – überzeugend zu lösen. Die damit einhergehende neue fluide, konnektionistische Theorie der (Neuro-)Kognition gründet sich dabei, zum einen, auf informationstheoretische Analysen mit Bezug auf den Begriff der Informationsentropie, zum anderen, auf Analysen im Rahmen der Theorie der nichtlinearen dynamischen komplexen Systeme, wonach ein (neuro-)kognitives System anhand von nichtlinearen Differentialgleichungen beschrieben werden kann, basierend auf konvergenten Vektorfeldern, Vektorflüssen und Vektorströmen in n -dimensionalen Systemphasenräumen (sog. „vektorielle Form“).

Das Buch richtet sich vor allem an Fachwissenschaftler aus den Disziplinen (Neuro-)Philosophie, (Neuro-)Informatik, und den kognitiven Neurowissenschaften sowie der Psychologie und Linguistik sowie an diejenige, die sich für den Themenbereich der Künstlichen Intelligenz interessieren. Für Student(-inn-)en bietet es darüberhinaus eine grundlegende Einführung in den Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus und die Theorie der künstlichen Neuronalen Netzwerke sowie die Informationstheorie, die Theorie der nichtlinearen Dynamischen Systeme und in das Bindungsproblem im Rahmen der neuronalen Kodierungstheorie in den kognitiven Neurowissenschaften.

Neben Prof. Dr. Peter Schroeder-Heister möchte ich hiermit auch anderen Dozenten ganz herzlich danken, damit dieses Buch entstehen konnte, und zwar Prof. Dr. Martin Bogdan, der mir in zahlreichen Gesprächen wertvolle Anregungen zum Verständnis von künstlichen neuronalen Netzwerken gegeben hat, Prof. Dr. Herbert Keuth, der mit seinen Lehrveranstaltungen mein Verständnis für Wissenschaftstheorie ungemein befördert hat, Prof. Dr. Dr. Walter Hoering, der dazu beigetragen hat, daß ich mich für dieses Thema entschieden hatte, und Prof. Dr. Markus Werning, der mit seinen Erläuterungen zu seiner oszillationsbasierten kognitiven Neuroarchitektur mein Verständnis dafür und zu den damit zusammenhängenden Synchronisationsmechanismen entscheidend vorangebracht hat.

Ferner bedanke ich mich bei meinen Studien- bzw. Doktorandenkollegen für anregende Gespräche und Hinweise, vor allem bei Dr. Thomas Piecha, Dr. John Michael, Dr. Matthias Neuber, Dr. Dr. Jochen Sautermeister, Dipl.-Inform. Andreas Jahnke und Antje Rumberg M.A.

Abschließend möchte ich mich noch ganz herzlich bei meiner Frau Renate Maurer, Diplombetriebswirtin (BA) und Steuerberaterin, bedanken, die mit einem Höchstmaß an Unterstützung, Geduld und Nachsicht es erst ermöglicht hat, daß diese Arbeit entstehen konnte, und schließlich bei meiner Mutter für das Korrekturlesen des Manuskripts.

Tübingen, im Winter 2014
Dr. phil. Harald Maurer M.A.

Wie würden wir die wunderbare Fähigkeit eines lebenden Organismus, den Zerfall in das thermodynamische Gleichgewicht (Tod) zu verzögern, in der Ausdrucksweise der statistischen Theorie darstellen? Wir sagten: »Er nährt sich von negativer Entropie«, indem er sozusagen einen Strom negativer Entropie zu sich hin zieht (...).

(Erwin SCHRÖDINGER: Was ist Leben?)

Selbstverständlich hat die Sprache diesen eigentümlich schwebenden Charakter. Wir wissen nie genau, was ein Wort bedeutet, und der Sinn dessen, was wir sagen, hängt von der Verbindung der Wörter im Satz ab, von dem Zusammenhang, in dem der Satz ausgesprochen wird, und von zahllosen Nebenumständen, die wir gar nicht alle aufzählen können. Wenn du einmal in den Schriften des amerikanischen Philosophen William James liest, wirst du finden, daß er diesen ganzen Sachverhalt wunderbar genau beschrieben hat. Er schildert, daß bei jedem Wort, das wir hören, zwar ein besonders wichtiger Sinn des Wortes im hellen Licht des Bewußtseins erscheint, daß aber daneben im Halbdunkel noch andere Bedeutungen sichtbar werden und vorbeigleiten, daß dort auch Verbindungen zu anderen Begriffen geschlagen werden und die Wirkungen sich bis in das Unbewußte hinein ausbreiten. Das ist in der gewöhnlichen Sprache so, erst recht in der Sprache der Dichter. Und das trifft bis zu einem gewissen Grad auch für die Sprache der Naturwissenschaft zu.

(Werner HEISENBERG: Der Teil und das Ganze)

Gott ist nicht der Schöpfer, sondern der Geist des Universums.

(Erich JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums)

Das Gehirn – Ein Orchester ohne Dirigent.

(Wolf SINGER: Max Planck Forschung.

Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft)

Our brain plays jazz.

(Gordon PIPA: Redwood Center for Theoretical Neuroscience)

Ein rein verstandesmäßiges Weltbild ganz ohne Mystik ist ein Unding.

(Erwin SCHRÖDINGER: Mein Leben, meine Weltansicht)

Jede Ursache ist die Wirkung ihrer eigenen Wirkung.

(Muh'yī d-Dīn Ibn 'ARABĪ: Der verborgene Schatz)

Panta rhei.

(PLATON mit Bezug auf HERAKLIT)

Nāda Brahmā – Die Welt ist Klang.

(Joachim-Ernst BERENDT)

Tief unter der Ozeanoberfläche beginnt sich eines Tages ein weiter flacher Kreis zu verdunkeln, mit ausgefranstem Rand und gleichsam pechübergossener Oberfläche. Nach mehr als zehn Stunden wird er lappig, weist immer deutlichere Gliederungen auf und stößt zugleich nach oben vor, der Ozeanoberfläche entgegen. Der Beobachter würde schwören, daß unter ihm ein heftiger Kampf tobt, denn wie Lippen, die sich zusammenkrampfen, wie lebende, muskulöse, sich schließende Krater laufen hier aus der ganzen Umgebung unendliche Reihen konzentrischer Ringwellen zusammen, stauen sich über dem tief unten ausgegossenen, schwärzlichen, schwankenden Phantom, bäumen sich und stürzen in die Tiefe. (...) Das dunkle Gebilde wird tiefer hin abgedrängt: jeder neue Aufschlag scheint es plattzuhämmern und aufzuspalten; von den einzelnen Lappen, die wie durchnäßte Flügel weghängen, teilen sich längliche Trauben ab, verschmälern sich zu langen Perlenschnüren, verschmelzen miteinander und schwimmen aufwärts, die gleichsam an sie angewachsene verklumpte Mutterscheibe hebend, indes von oben in den immer deutlicher eingebuchteten Kreis nacheinander die Wellenringe fallen.
(Stanislaw LEM: Solaris)

Und das Ergebnis dieser Betrachtung lautet nun: Wir sehen ein kompliziertes Netz von Ähnlichkeiten, die einander übergreifen und kreuzen. (...) Ich kann diese Ähnlichkeiten nicht besser charakterisieren als durch das Wort
»Familienähnlichkeiten«;
(Ludwig WITTGENSTEIN: Philosophische Untersuchungen)

Wir gehen einer neuen Synthese entgegen, einer neuen Naturauffassung, in der die abendländische Tradition, die das Experiment und die quantitative Formulierung betont, sich mit der chinesischen Tradition verknüpft, in deren Mittelpunkt die Auffassung von einer spontan sich selbst organisierenden Welt steht.
(Ilya PRIGOGINE & Isabelle STENGERS: Dialog mit der Natur)

Erkennt man den Fehler in dem Standpunkt, daß die Dinge unabhängig oder aus eigener Kraft existieren, so bleibt keine andere Möglichkeit als ihre abhängige Existenz. Und weil die Dinge in abhängiger Weise existieren, sind sie leer davon, unabhängig, aus eigener Kraft zu existieren; folglich haben sie eine Natur, die leer von einer solchen Unabhängigkeit ist, die man »Selbst« (sanskr.: ātman) nennt. Diese Leerheit von einem »Selbst« ist die Bestehensweise der Phänomene. (...) Weil die Leerheit von inhärenter Existenz die Wirklichkeit ist, die von einem logischen Bewußtsein gefunden wird, das die endgültige Existenzweise der Phänomene untersucht, wird sie die »Wahrheit der höchsten Wirklichkeit« (sanskr.: paramārthasatya), die endgültige Wahrheit, genannt.
(DALAI LAMA: Die Vorträge in Harvard)

ZUSAMMENFASSUNG

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit besteht darin, aufbauend auf dem (Haupt-)Thema, der Darlegung und Untersuchung der Lösung des Bindungsproblems anhand von temporalen integrativen (Synchronisations-)Mechanismen im Rahmen der kognitiven (Neuro-)Architekturen im (Neo-)Konnektionismus mit Bezug auf die Wahrnehmungs- und Sprachkognition, vor allem mit Bezug auf die dabei auftretende Kompositionalitäts- und Systematizitätsproblematik, die Konstruktion einer noch zu entwickelnden integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition zu skizzieren, auf der Basis des Repräsentationsformats einer sog. „vektoriellen Form“, u.z. vor dem Hintergrund des (Neo-)Konnektionismus, der Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme, der Informationstheorie und des Selbstorganisations-Paradigmas.

KAPITELVERZEICHNIS

Vorwort ...	III-VI
Zusammenfassung der Promotionsarbeit ...	VII
Kapitelverzeichnis ...	VIII-XIII
Abkürzungsverzeichnis ...	XIV-XV
0. Thema und Motivation: Theorie der (Neuro-)Kognition und integrative (Synchronisations-)Mechanismen ...	001
0.1 Systemtheoretischer (Neo-)Konnektionismus mit seinen integrativen (Synchronisations-)Mechanismen und die Konstruktion einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition ...	001
0.2 Kapitelstruktur und (Gesamt-)Argumentation der Promotionsarbeit ...	002
1. Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme und Kognitions- wissenschaft: Integrative Kognitionstheorie, Kognitivismus und Komputationalismus ...	003
1.1 Kognitionswissenschaft: Integrative Theorie der Kognition und Kognitivismus ...	004
1.11 Integrative Kognitionstheorie und Kognitionswissenschaft ...	004
1.12 Subdisziplinen der Kognitionswissenschaft ...	007
1.13 Methodologie und Methoden der Kognitionswissenschaft ...	008
1.14 Kognitionswissenschaft und (nichtlineare) Dynamische Systemtheorie ...	011
1.2 (Generelle) Theorie und Modellkonzeptionen der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme ...	013
1.21 (Generelle) Systemtheorie und Systemanalyse ...	014
1.22 (Generelle) Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme ...	018
1.23 Paradigma der Selbstorganisation ...	030
1.24 Diverse Modellkonzeptionen (Philosophie und Wissenschaftstheorie) ...	036
1.24.01 General Systems Theory nach L. von Bertalanffy ...	037
1.24.02 Synthetische Philosophie nach H. Lenk und G. Ropohl ...	039
1.24.03 Dynamic (System) Hypothesis nach T. van Gelder und R.F. Port ...	039
1.24.04 Theorie der komplexen Systeme mit nichtlinearer Dynamik nach Kl. Mainzer ...	041
1.25 Diverse Modellkonzeptionen (Natur-, Human, Sozial- und Kulturwissen- schaften) ...	043
1.25.01 Dissipative Structures Theory nach I. Prigogine, P. Glansdorff und G. Nicolis ...	043
1.25.02 Synergetik nach H. Haken ...	047
1.25.03 Theorie der (autokatalytischen) Hyperzyklen nach M. Eigen und P. Schuster ...	050
1.25.04 NK Adaptive Landscape Model nach St.A. Kauffman ...	051

1.25.05 Autopoiesis nach H.R. Maturana und Fr.J. Varela ...	053
1.25.06 Systemtheorie der Evolution nach R. Riedl, G.P. Wagner, Fr.M. Wuketits und E. Mayr ...	054
1.25.07 Theorie der kognitiven Stadien und genetische Epistemologie nach J. Piaget ...	056
1.25.08 Systemische Psychologie nach G. Strunk und G. Schiepek ...	057
1.25.09 Theorie der Sozialen Systeme nach N. Luhmann ...	058
2. Theoretische Modelle des (Neo-)Konnektionismus und des Symbolismus ...	060
2.1 Konzeption der Klassischen Symboltheorie ...	061
2.11 Symbolische Methode: Symbolische Informationsverarbeitung auf der Basis von Symbolen und Symbolstrukturen ...	061
2.12 Lokale (Symbol-)Repräsentation ...	063
2.13 Symbolische Produktionssysteme ...	064
2.14 Positive Motive für den Symbolismus: Standardargument nach J.A. Fodor und Z.W. Pylyshyn ...	065
2.141 Produktivität der mentalen Repräsentationen ...	067
2.142 Systematizität der mentalen Repräsentationen ...	067
2.143 Semantische Kompositionalität der mentalen Repräsentationen ...	068
2.144 Systematizität der Inferenz und inferentielle Homogenität ...	070
2.145 Representational Theory of Mind und Language of Thought im Sinne von J.A. Fodor ...	071
2.15 Kritik am Symbolismus ...	072
2.2 Konzeption der Konnektionistischen Theorie ...	074
2.21 Konnektionistische Methode: konnektionistische („subsymbolische“) Informationsverarbeitung auf der Basis der „Vektoriellen Form“ im Sinne der Theorie der (künstlichen) Neuronalen Netzwerke ...	074
2.22 Konnektionistische Repräsentation und Repräsentationstypologie ...	085
2.23 Konnektionistische vektorbasierte Informationsdynamik: Energiefunktion und „Potentiallandschafts“-Metapher ...	092
2.24 Konnektionistische Informationsverarbeitung: „regelbeherrscht“ vs. „regelgeleitet“ vs. „regelinstanzierend“ ...	096
2.25 Diverse basale (Architektur-)Modellkonzeptionen ...	100
2.25.01 Perceptron nach Fr. Rosenblatt ...	100
2.25.02 Simple Recurrent Network nach J.L. Elman ...	101
2.25.03 Hopfield Network nach J.J. Hopfield und Linear Associator Model nach J.A. Anderson ...	103
2.26 Klassische Architekturen im (Neo-)Konnektionismus ...	105
2.27 Konnektionismus und Dynamische Systemtheorie ...	106
2.28 Positive Motive für den Konnektionismus ...	108
2.29 Kritik am Konnektionismus ...	112

3. Integrative Mechanismen und Modelle in den kognitiven Neurowissenschaften ...	114
3.1 Experimentelle Methoden und Techniken in den (kognitiven) Neurowissenschaften ...	115
3.2 Methodische Prinzipien und Schemata der neuronalen Kodierung in den (kognitiven) Neurowissenschaften ...	118
3.3 (Allgemeines) Bindungsproblem und integrative neur(-on-)ale (Synchronisations-)Mechanismen in den (kognitiven) Neurowissenschaften ...	129
3.4 Exkurs: Integration von neuronalen Informationen in der visuellen Perzeption anhand der (temporalen) Synchronisationshypothese ...	140
3.41 (Allgemeine) Bindungsproblematik in den kognitiven Neurowissenschaften ...	142
3.42 Sensorische (Konturen-)Segmentation in der visuellen Szenenanalyse ...	143
3.43 Intramodale perzeptive Integration bei anderen sensorischen Systemen ...	164
3.44 Intermodale Integration von sensorischen Informationen ...	165
3.45 Sensomotorische Integration von neuronalen Informationen...	165
3.46 Neuronale Synchronisation und (visuelle) Aufmerksamkeit(-smechanismen) ...	166
3.47 Kritik der Binding-by-Synchrony Hypothese und des Assembly-Modells ...	168
3.48 Fazit ...	174
4. Prozeßtheorie einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition: Vektorielle Informationstheorie ...	176
4.1 Theorie einer (Neg-)Entropiebasierten Information ...	177
4.10 Thermodynamische Entropie ...	177
4.11 (Neg-)Entropiebasierte Informationstheorie ...	178
4.12 Strukturelle „Analogie“ zur Harmonietheorie nach P. Smolensky ...	182
4.13 Informationstheoretische Analysen von neuronalen Populationen ...	183
4.14 Generelle Unifizierte Informationstheorie ...	185
4.2 Methoden und methodische Prinzipien einer neurokognitiven Informationstheorie im Konnektionismus ...	187
4.21 Multivaria(n)te Cluster Analysis ...	188
4.22 Parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling ...	193
4.23 (Stochastic) Gradient Descent Method ...	200
4.24 Statistical Mechanics Analysis ...	204
4.25 Attractor Modeling ...	206
4.26 Agent-Based Modeling: Multi-Agent Systems und Collective Information (Metaheuristics for Stochastic Optimization) ...	207

4.3 Diverse informationstheoretische Modellkonzeptionen ...	210
4.3.01 Functional Clustering Model und Information Integration Theory nach G.M. Edelman, G. Tononi und O. Sporns ...	211
4.3.02 Harmony Theory nach P. Smolensky ...	223
4.3.03 Free-Energy Principle nach K. Friston ...	232
4.4 Diverse wahrscheinlichkeitstheoretische (Neuro-)Architekturen und Algorithmen ...	236
4.4.01 Self-Organizing (Feature) Map nach T. Kohonen ...	237
4.4.02 Adaptive Resonance Theory nach St. Grossberg und G.A. Carpenter ...	244
5. Strukturtheorie einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition: Architekturtypen und Architekturkomponenten ...	256
5.1 Systematische Klasse der Klassischen Vektor-basierten Architekturtypen ...	257
5.1.01 Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture nach P. Smolensky ...	262
5.1.02 Holographic Reduced Representations nach T.A. Plate ...	291
5.1.03 Neural Engineering Framework nach Chr. Eliasmith und T.C. Stewart ...	296
5.1.04 Learning and Inference with Schemas and Analogies nach J.E. Hummel und K.J. Holyoak ...	303
5.1.05 SHRUTI Architectures nach L. Shastri ...	307
5.1.06 INFERNET nach J.P. Sougné ...	313
5.1.07 (Combinatorially Endowed) Hebbian-Competitive Network nach R.F. Hadley ...	315
5.1.08 (Hybrid) CONSYDERR Architecture nach R. Sun ...	317
5.1.09 Neural Blackboard Architectures nach Fr. van der Velde und M. de Kamps ...	319
5.1.10 Dynamic Link Architecture nach Chr. von der Malsburg ...	324
5.2 Systematische Klasse der Attraktor-basierten Architekturtypen ...	326
5.2.01 K0-KV Set Attractor Network Models nach W.J. Freeman ...	327
5.2.02 Morphodynamic Attractor Model nach J. Petitot ...	332
5.2.03 Synfire Chains und Corticonics nach M. Abeles ...	338
5.2.04 Modulare Neurodynamische Systeme nach Fr. Pasemann ...	342
5.2.05 Platonic Model und Feature Space Mapping Network nach W. Duch ...	345
5.2.06 Attractor Neural Networks Model nach D.J. Amit ...	348
5.2.07 Recurrent (Articulated) Attractor Network Model nach D.C. Noelle und G.W. Cottrell ...	350
5.3 Systematische Klasse der Oszillator-basierten Architekturtypen ...	351
5.3.01 Oscillatory Networks nach M. Werning ...	355
5.3.02 Self-Organizing Neuronal Oscillator Model nach P. König und Th.B. Schillen ...	377

5.4 Systematische Klasse der Synapsen-basierten Architekturtypen ...	379
5.4.01 Stochastic Synaptic Model (SSM) nach W. Maass und A.M. Zador ...	380
5.4.02 Modified Stochastic Synaptic Model (MSSM) nach K. El-Laithy und M. Bogdan ...	384
6. Konsequenzen und Implikationen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus für die (kognitive) (Neuro-)Philosophie und Wissenschaftstheorie ...	388
6.1 Philosophiehistorischer Exkurs: (Repräsentations-)Formate der Kognition ...	389
6.11 Komputationale Form der Kognition im Rahmen der Monadologie und einer Mathesis Universalis nach G.W. Leibniz ...	390
6.12 Assoziative Form der Kognition im Rahmen des empirisch-mechanischen Psychologismus nach D. Hume ...	392
6.13 Kategoriale Form der Kognition im Sinne der Transzendentalphilosophie nach I. Kant ...	394
6.14 Logische Form der (Sprach-)Kognition im Sinne des Logischen Positivismus des Wiener Kreises nach G. Frege, B. Russell, L. Wittgenstein, M. Schlick, O. Neurath, R. Carnap, K. Popper und W.V.O. Quine ...	395
6.15 Vektorielle Form der (Neuro-)Kognition im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus ...	399
6.15.01 Neurophilosophy nach P.M. Churchland und P. Smith Churchland ...	400
6.15.02 (Connectionistic) Dynamical Mechanistic Approach nach W. Bechtel ...	405
6.15.03 (Noncomputable) Dynamical Cognition Approach nach T. Horgan und J. Tienson ...	408
6.15.04 Connectionistic Microfunctionalism nach A. Clark ...	411
6.15.05 Conceptual Spaces nach P. Gärdenfors ...	413
6.15.06 Neuro(-partitions-)logik nach O. Breidbach ...	417
6.15.07 Dynamical Hypothesis nach T. van Gelder ...	421
6.15.08 Theorie der komplexen Systeme mit nichtlinearer Dynamik nach Kl. Mainzer ...	423
6.2 Generelle vektorielle Form eines neurokognitiven (Repräsentations-)Konzepts im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus ...	426
6.3 Diskussion der integrativen (Synchronisations-)Mechanismen in Bezug auf die Wahrnehmungskognition (Low-Level Cognition): Kompositum im Sinne des "feature binding" (Perzept) und dessen Modell einer kompositionalen (Neuro-)Semantik ...	433
6.4 Diskussion der integrativen (Synchronisations-)Mechanismen in Bezug auf die Sprachkognition (High-Level Cognition): Kompositum im Sinne des "variable binding" (Konzept und Proposition) und dessen Modell einer kompositionalen (Neuro-)Semantik ...	449

6.5 Skizze einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus mit Bezug auf den (Forschungs-)Ansatz des Embodiment und der Embodied Cognition ...	486
6.51 Minimaldefinition des Embodiment Approach und der Embodied Cognitive Science in der (Neuro-)Kognitionswissenschaft ...	487
6.52 Positionen in der Embodied Cognition ...	489
6.52.01 Resonant Cell Assemblies und Neurophenomenological Perspective nach Fr.J. Varela ...	490
6.52.02 (Modal) Theory of Perceptual Symbol System (PSS) nach L.W. Barsalou ...	493
6.53 Diskussion der integrativen (Synchronisations-)Mechanismen im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus mit Bezug auf eine integrative Theorie im Sinne der Embodied, Situated und Social Cognition ...	497
6.54 Diskussion der integrativen (Synchronisations-)Mechanismen im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus mit Bezug auf den Repräsentationalismus in der (Neuro-)Kognitionswissenschaft ...	498
7. Evaluation, Kritik und Fazit: Konnektionistische (Neuro-)Kognition, stochastische selbstorganisierte (neuro-)kognitive (System-)Dynamik und integrative (Synchronisations-)Mechanismen auf der Basis einer systemtheoretischen vektoriellen Form ...	500
7.1 Evaluation und Kritik der (Neuro-)Architekturen im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus mit ihren integrativen (Synchronisations-)Mechanismen ...	501
7.2 Fazit: Position des Autors ...	504
Literaturverzeichnis ...	516-620

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a.A., A.A.	andere Ansicht, anderer Ansicht
Abb.	Abbildung
A.d.V.	Anmerkung des Verfassers
a.E.	am Ende
Bd.	Band
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
Chap.	Chapter
d.b.	das bedeutet
d.f.	daraus folgt
d.h.	das heißt
ders., Ders.	derselbe
dt.	deutsch
engl.	englisch
et. al.	et alii, et aliae, et alia (dt.: und andere)
etc.	et cetera bzw. ecetera (dt.: und andere)
Fn.	Fußnote
franz.	Französisch
gem.	gemäß
Gl.	Gleichung
griech.	griechisch
Hf.	Heft
h.M.	herrschende Meinung
i.B.a.	in Bezug auf
i.d.R.	in der Regel
i.e.S.	im engeren Sinn
i.S.(v.)	im Sinne (von)
i.w.S.	im weiteren Sinn
Jhdt.	Jahrhundert
Kap.	Kapitel
lat.	lateinisch
m.E., M.E.	meines Erachtens
m.a.W.	mit anderen Worten
m.B.a.	mit Bezug auf
m.w.Lit.	mit weiterer Literatur
s., S.	siehe, Siehe
sanskrit.	Sanskrit
sog.	sogenannte, sogenannten, sogenannter
s.v.w.	so viel wie
übers.	übersetzt
u.z.	und zwar
v.a.	vor allem

Vgl.	Vergleiche
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
Zit.	Zitiert

0. THEMA UND MOTIVATION: THEORIE DER (NEURO-)KOGNITION UND INTEGRATIVE (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN

0.1 Seit den siebziger und achtziger Jahren des 20. Jhdt. ist mit dem Aufkommen der Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme und der dadurch beeinflussten, damit einhergehenden Entwicklung eines systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus in den kognitiven Neurowissenschaften und der Kognitionswissenschaft eine Tendenz zu verzeichnen, die Analyse und Modellierung der neuralen Informationsverarbeitung des menschlichen Gehirns mit den, diesem systemtheoretischen Paradigma entsprechenden Methoden durchzuführen, sodaß das neurale System und die damit verbundene (Neuro-)Kognition daher unter dieser Perspektive einer nichtlinearen Systemdynamik betrachtet wird. In der Folgezeit sind nun im (Neo-)Konnektionismus eine Vielzahl von kognitiven (Neuro-)Architekturen entwickelt worden, basierend auf den empirisch-experimentellen Daten vor allem aus der Neurophysiologie, die versuchen, vor allem mit ihren integrativen (Synchronisations-)Mechanismen, (neuro-)kognitive (Wahrnehmungs-, Sprach- und Denk-)Leistungen des Menschen im Rahmen des Bindungsproblems neurobiologisch, neurophysiologisch und neuropsychologisch plausibel zu modellieren, sodaß insbesondere der dynamische (Bindungs-)Charakter der menschlichen Kognition angemessen berücksichtigt werden kann, d.h., daß Wahrnehmen, Denken, Sprechen, Schlußfolgern und Entscheiden anhand von Fließmustern als ein fließendes Geschehen in der Zeit wiedergegeben werden kann.

Damit geht einher das Bestreben in der vorliegenden Arbeit, aufbauend auf dem (Haupt-)Thema, der Darlegung und Untersuchung der Lösung des Bindungsproblems anhand von temporalen integrativen (Synchronisations-)Mechanismen im Rahmen dieser kognitiven (Neuro-)Architekturen im (Neo-)Konnektionismus mit Bezug auf die Wahrnehmungs- und Sprachkognition, vor allem mit Bezug auf die dabei auftretende Kompositionalitäts- und Systematizitätsproblematik, die noch zu entwickelnde Konstruktion einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition zu skizzieren, u.z. auf der Basis des Repräsentationsformats einer sog. „vektoriellen Form“. In Analogie zu den Methoden und Modellen in der statistischen Thermodynamik und der Hydrodynamik aus der Physik sowie der Theorie der künstlichen neuronalen Netzwerke aus der (Neuro-)Informatik wird dann der Versuch unternommen, anhand der Berechnungsleistungen der am besten neurobiologisch plausiblen (Neuro-)Architekturen, gegründet auf interne mentale Repräsentationen in Form von nichtlinearen dynamischen Vektorfeldern, die Idee vom menschlichen Gehirn als einer selbstorganisierten, flexiblen und adaptiven „organismischen Maschine“ plausibel zu machen, dessen theoretische Modelle – in grundlegender Weise – anhand der „verflüssigten“ (neuro-)kognitiven Operationen, Algorithmen und Mechanismen in naher Zukunft die Lebendigkeit eines biologischen Organismus in hinreichender Weise angemessen einzufangen in der Lage sein werden.

Diese in der vorliegenden Arbeit hierbei eingenommene Dritte-Person-Perspektive läßt dabei selbstverständlich die aus der Erste-Person-Perspektive entwickelnden phänomenologischen ((Selbst-)Bewußtseins-)Analysen unbenom-

men und versteht sich eher als Ergänzung dieser.

0.2 In der vorliegenden Arbeit wird zuerst eine Einführung in die Kognitionswissenschaft und in die sie beeinflussende (Generelle) Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme gegeben (Kap. 1), damit anhand der entsprechenden Grundbegriffe und Grundaussagen das benötigte (Vor-)Wissen vorhanden ist, um dann anschließend die beiden grundlegenden Kognitionsparadigmen in der Kognitionswissenschaft, die Klassische Symboltheorie und die Theorie des (Neo-)Konnektionismus, zu behandeln (Kap. 2). Daran anschließend wird dann das allgemeine Bindungsproblem in den kognitiven Neurowissenschaften erläutert sowie die empirisch-experimentellen Belege für temporale integrative (Synchronisations-)Mechanismen zur Lösung des Bindungsproblems in den kognitiven Neurowissenschaften angeführt. Nachdem die entsprechenden theoretischen (Neuro-)Architekturen mit ihren entsprechenden Methoden analysiert worden sind (Kap. 4 und Kap. 5), wird danach das (Haupt-)Thema der vorliegenden Arbeit angegangen werden, wie integrative (Synchronisations-)Mechanismen in diesen (Neuro-)Architekturen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus das (allgemeine) Bindungsproblem (engl. "(general) binding problem"), vor allem in Form der Eigenschafts- und Variablenbindung in den Kognitions- und Neurowissenschaften, zu lösen versuchen, unter Einschluß der philosophischen und wissenschaftstheoretischen Positionen und Modelle (Kap. 6). Abschließend wird dann noch eine Gesamtbetrachtung und Gesamtbewertung der Diskussion um das Bindungsproblem vorgenommen werden, vor allem auch in Bezug auf eine umfassende integrative Theorie der (Neuro-)Kognition vor dem Hintergrund des (Neo-)Konnektionismus, der Theorie der nichtlinearen Dynamischen Systeme, der Informationstheorie und des Selbstorganisationsparadigmas (Kap. 7).

1. THEORIE DER (NICHTLINEAREN) DYNAMISCHEN SYSTEME UND KOGNITIONSWISSENSCHAFT: INTEGRATIVE KOGNITIONSTHEORIE, KOGNITIVISMUS UND KOMPUTATIONALISMUS

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden zuerst eine Einführung in die Kognitionswissenschaft (Kap. 1.1) und in die sie in letzter Zeit stark beeinflussende (generelle) Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme (Kap. 1.2) gegeben, damit anhand der entsprechenden Grundbegriffe und Grundaussagen das benötigte (Vor-)Wissen bereitgestellt worden sein wird, um dann anschließend die beiden grundlegenden alternativen Kognitionsmodelltypen in der Kognitionswissenschaft, die klassische Symboltheorie zum einen, und, zum anderen, vor allem die konnektionistische Theorie angemessen behandeln zu können (Kap. 2), u.a. auch in Bezug auf ihr Bestreben im Rahmen der Grundannahme, daß (Neuro-)Kognition (am besten) anhand von Berechnungsprozessen beschrieben werden kann, eine möglichst umfassende und angemessene Theorie der (Neuro-)Kognition vorzulegen.

1.1 KOGNITIONSWISSENSCHAFT: INTEGRATIVE THEORIE DER KOGNITION UND KOGNITIVISMUS¹

1.11 Die seit der Mitte der siebziger Jahre des 20. Jhdts im Zuge der sog. „kognitiven Wende“ (engl. “cognitive turn”) in den Humanwissenschaften² in den USA entstandene sog. „Kognitionswissenschaft“ (engl. “cognitive science”)³

-
- 1 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des gleichnamigen Kapitels 1. meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009.
- 2 S. z.B. G. STRUBE: Kognitionswissenschaft. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 318 – W. BECHTEL / M. HERSCHBACH: Philosophy of the Cognitive Sciences. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): Philosophy of the Sciences. Blackwell. Oxford. 2010. P. 239 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 4, 14.
- 3 Eine grundlegende Einführung in die Kognitionswissenschaft bietet z.B. P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005 – N.A. STILLINGS / S.E. WEISLER / C.H. CHASE / M.H.FEINSTEIN / J.L. GARFIELD / E.L. RISSLAND: Cognitive Science: An Introduction. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MASS. 1995 – M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Malden/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998 – C.P. SOBEL: The Cognitive Sciences. An Interdisciplinary Approach. Mayfield. Mountain View/CA. 2001 – B. von ECKARDT: What is Cognitive Science? MIT Press. Cambridge/MASS. 1993 – D.W. GREEN et al.: Cognitive Science. An Introduction. Blackwell. Oxford. 1996 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995 – F.J. VARELA: Kognitionswissenschaft, Kognitionstechnik. Eine Skizze aktueller Perspektiven. 3. Aufl. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1993.
- S. auch E. LEPORE / Z.W. PYLYSHYN (Eds.): What is Cognitive Science? Blackwell Publishers. Malden/MA, Oxford/UK. 1999 – D. MÜNCH (Hrsg.): Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1992.
- Eine kurze Einführung in die Kognitionswissenschaft bietet z.B. W. BECHTEL / M. HERSCHBACH: Philosophy of the Cognitive Sciences. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): Philosophy of the Sciences. Blackwell. Oxford. 2010. PP. 237-61 – B. von ECKARDT: Cognitive Science: Philosophical Issues. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 552-59 – H.A. SIMON / C.A. KAPLAN: Foundations of Cognitive Science. In: M.I. POSNER (Ed.): Foundations of Cognitive Science. MIT Press. Cambridge/MASS. 1989. PP. 1-47 – P. THAGARD: Cognitive Science. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (June 9, 2010 Edition). From: <http://plato.stanford.edu/entries/cognitive-science/> – G. STRUBE: Kognitionswissenschaft. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 317-19 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 4-9 – M. LENZEN: Natürliche und künstliche Intelligenz. Einführung in die Kognitionswissenschaft. Campus Verl. Frankfurt/New York. 2002. S. 9-22.
- Einführend zur Geschichte der Kognitionswissenschaft s. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN / G. GRAHAM: The Life of Cognitive Science. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. PP. 1-104 – G. STRUBE: Kognition. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 305 – G. STRUBE: Kognitionswissenschaft. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 318-19 – P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 5-7 – W. BECHTEL / M. HERSCHBACH: Philosophy of the Cognitive Sciences. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): Philosophy of the Sciences. Blackwell. Oxford. 2010. PP. 239-43 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 4-6.
- Eingehend zur Geschichte der Kognitionswissenschaft s. z.B. E. SCHEERER: Towards a History of

beschäftigt sich, allgemein gesagt, vor allem mit der Untersuchung der geistigen Leistungen des Menschen, aber auch mit der Erforschung der sog. „Kognition“ (engl. „cognition“)⁴ nicht nur bei natürlichen, sondern auch bei künstlichen bzw. technischen kognitiven Systemen⁵ unter der Grundannahme, daß die kognitiven Modelle und Architekturen mit ihren kognitiven Strukturen, Prozessen, Mechanismen und Modulen – auf der Basis des sog. „Signal-, Daten- und Informationsverarbeitungsparadigmas“⁶ – als mit Berechnung (engl. „computation“)⁷ zu beschreibende geistige Fähigkeiten und Fertigkeiten anzusehen sind (sog. „Kognitivismus“ (engl. „cognitivism“)⁸), m.a.W.: es stellt sich im Rahmen der Erarbeitung einer integrativen Kognitionstheorie⁹ die Frage, wie natürliche und künstliche Intelligenz (engl. „natural and artificial intelligence“)¹⁰ mit Hilfe von menta-

Cognitive Science. International Social Science Journal. Bd. 115. 1988. PP. 7-18.

- 4 Zu den Begriffen der „Kognition“ und „kognitiv“ s. z.B. G. STRUBE: Kognition. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 303 – G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Kognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 19-71 – W. PRINZ: Kognition, kognitiv. In: J. RITTER / K. GRÜNDER: Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 4. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1976. S. 866-78.
S. auch H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 6-8.
Die Begriffe der „Kognition“ und „kognitiv“ leiten sich her von lat. „cognoscere“ bzw. griech. „γινώσκω (gignoskein)“, dt. „erkennen, wahrnehmen, wissen“.
- 5 Zum Begriff des sog. „kognitiven Systems“ (engl. „cognitive system“) s. z.B. G. STRUBE: Kognition. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 304.
- 6 Das Signalverarbeitungsparadigma wird dabei aus der kognitiven Neuro- und der Ingenieurwissenschaft aufgegriffen, das Datenverarbeitungsparadigma aus der Informatik und das Informationsverarbeitungsparadigma aus der kognitiven (Neuro-)Psychologie und Neurobiologie.
S. z.B. J.T. TOWNSEND / K. TORII: Information Processing. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 544-50 – M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Malden/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998. P. 5.
- 7 S. hierzu z.B. B. von ECKARDT: Cognitive Science: Philosophical Issues. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 556-58.
- 8 S. z.B. É. PACHERIE: Cognitivism. In: O. HOUDÉ et al. (Eds.): Dictionary of Cognitive Science. Neuroscience, Psychology, Artificial Intelligence, Linguistic, and Philosophy. Psychology Press. New York, Hove. 2004. P. 57 – G. STRUBE: Kognitivismus. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 319.
Man spricht auch von der sog. „Computational Theory of Mind“. S. z.B. St. HORST: Computational Theory of Mind. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MASS, London. 1999. PP. 170-72.
- 9 S. z.B. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 100-102 unter Verweis auf das „Ameisenhaufen“- Bsp. in D.R. HOFSTADTER: Metamagical Themas: Questing for the Essence of Mind and Pattern. Basic Books. New York. 1985. P. 646.
- 10 S. hierzu z.B. M. ESTEP: Self-Organizing Natural Intelligence. Issues of Knowing, Meaning, and Complexity. Springer-Verl. Dordrecht. 2006 – G. LUGER / W. STUBBLEFIELD: Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 5th Ed. Pearson Education Limited. Harlow. 2005 – A.M. DE CALLATÿ: Natural and Artificial Intelligence. Misconceptions about Brains

len bzw. kognitiven Strukturen, Prozessen und Mechanismen einheitlich zu erklären sind, wobei diese einem breiten kognitiven Spektrum¹¹ zugeordnet werden können, das von der Fähigkeit zum konkreten, assoziativen Verarbeiten von Wahrnehmungsreizen (niedere, zumeist unbewußte Kognition (engl. "low-level cognition")) bis zum abstrakten, symbolischen Lernen, Vorstellen, Denken und Problemlösen (höhere, zumeist bewußte Kognition (engl. "higher-level cognition")) reicht, unter Einschluß von Gedächtnis- und Sprachverarbeitungsleistungen. Auf der Basis der Abstraktion von der physischen Implementierung dieser (mentalen bzw. kognitiven) Strukturen, Prozesse und Mechanismen besteht demnach die zentrale Thematik der Kognitionswissenschaft im Auffinden von – formal mathematischen und logischen – komputationalen (Prozeß-)Algorithmen (engl. "algorithms")¹² i.S. von Berechnungsverfahren (engl. "computational procedures"), die, zwischen der Sensorik und Motorik eines kognitiven Systems sich befindend, auf (Daten- bzw. Informations-)Strukturen in Form von internen sog. „mentalen Repräsentationen“ (engl. "mental representations")¹³ operieren (sog. "Computational-Representational Understanding of Mind (CRUM)").¹⁴ In letzter Zeit kann man nun, daran anknüpfend, das Bestreben in der Kognitionswissen-

and Neural Networks. Expanded Ed. North Holland Publishing Co. Amsterdam, New York. 1992. Die Frage, ob darunter auch die sog. „Körperintelligenz“ (engl. "embodied cognition") oder sog. „Prärationale Intelligenz“ fällt, ist umstritten. S. hierzu z.B. M. LENZEN: Natürliche und künstliche Intelligenz. Einführung in die Kognitionswissenschaft. Campus Verl. Frankfurt/New York. 2002. S. 10.

11 Zum Begriff des sog. „kognitiven Spektrums“ s. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 71.

12 Zum Begriff des sog. „Algorithmus“ (engl. "algorithm") s. z.B. E. DIETRICH: Algorithm. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 11-12 – U. SCHMID / M.Chr. KINDSMÜLLER: Kognitive Modellierung. Eine Einführung in die logischen und algorithmischen Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 107-13, v.a. S. 108.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.13.

13 Zum Begriff der sog. „mentalen Repräsentation“ (engl. "mental representation") s. z.B. B. von ECKARDT: Mental Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MASS, London. 1999. PP. 527-29 – W. GLASER: Repräsentation. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 577-78 – W. BECHTEL: Representations: From Neural Systems to Cognitive Science. In: W. BECHTEL / P. MANDIK / J. MUNDALE / R. S. STUFFLEBEAM (Eds.): Philosophy and the Neurosciences: A Reader. Basil Blackwell. Oxford. 2001. PP. 332-48.

S. auch B. von ECKARDT: What is Cognitive Science? MIT Press. Cambridge/MASS. 1993. PP. 161-95 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 101-24 – W. BECHTEL / M. HERSCHBACH: Philosophy of the Cognitive Sciences. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): Philosophy of the Sciences. Blackwell. Oxford. 2010. PP. 245-53 – G.J. DALENOORT: Toward a General Theory of Representations. Psychological Research. Vol. 52. 1990. PP. 229-37, v.a. PP. 229-30, 230-31.

14 S. P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 10-12, v.a. P. 10: "Here is the central hypothesis of cognitive science: Thinking can best be understood in terms of representational structures in the mind and computational procedures that operate on those structures."

S. auch N.A. STILLINGS / S.E. WEISLER / C.H. CHASE / M.H. FEINSTEIN / J.L. GARFIELD / E.L. RISSLAND: Cognitive Science: An Introduction. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MASS. 1995. PP. 2-7.

schaft feststellen, in dem Bemühen sich an naturwissenschaftlichen Erklärungsmethoden und -modellen zu orientieren, sich mit dem Begriff des sog. „(mentalen bzw. kognitiven) Mechanismus“ (engl. “(mental / cognitive) mechanism”)¹⁵ zu beschäftigen, um mentales bzw. kognitives Verhalten eines (neuro-)kognitiven (Informationsverarbeitungs-)Systems¹⁶ angemessen zu erklären. In der vorliegenden Arbeit wird daher vor allem zu untersuchen sein, wie integrative (Synchronisations-)Mechanismen in neurokognitiven Architekturmodellen das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. “(general) binding problem”) in den Kognitions- und Neurowissenschaften zu lösen versuchen.

15 Einführend s. z.B. C.F. CRAVER / W. BECHTEL: Mechanism and Mechanistic Explanation. In: S. SARKAR / J. PFEIFER (Eds.): *Philosophy of Science: An Encyclopedia*. Routledge. New York. 2006. PP. 469-78.

Eingehend s. z.B. W. BECHTEL: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. Routledge. London. 2008 – C. CRAVER: *Explaining the Brain. Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2007.

S. auch W. BECHTEL / R.C. RICHARDSON: *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*. Princeton University Press. Princeton/NJ. 1993 – W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Explanation: A Mechanistic Alternative*. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*. Vol. 36. 2005. PP. 421-41 – W. BECHTEL: *Constructing a Philosophy of Science of Cognitive Science*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 1. 2009. PP. 548-69 – S. GLENNAN: *Mechanisms and the Nature of Causation*. *Erkenntnis*. Vol. 44. 1996. PP. 50-71 – S. GLENNAN: *Rethinking Mechanistic Explanation*. *Philosophy of Science*. Vol. 69. 2002. PP. S342-53 – P. MACHAMER / L. DARDEN / C. CRAVER: *Thinking about Mechanisms*. *Philosophy of Science*. Vol. 67. 2000. PP. 1-25 – J. TABERY: *Synthesizing Activities and Interactions in the Concept of a Mechanism*. *Philosophy of Science*. Vol. 71. 2004. PP. 1-15 – J. WOODWARD: *What is a Mechanism? A Counterfactual Account*. *Philosophy of Science*. Supplement. Vol. 69. 2002. PP. S366-77. Zum Begriff des sog. „(mentalen bzw. kognitiven) Mechanismus“ (engl. “(mental / cognitive) mechanism”) siehe – unter Hinweis auf W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Explanation: A Mechanistic Alternative*. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*. Vol. 36. 2005. PP. 421-41, v.a. P. 423 und W. BECHTEL: *Discovering Cell Mechanisms: The Creation of Modern Cell Biology*. Cambridge University Press. Cambridge. 2006 – z.B. W. BECHTEL: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. Routledge. London. 2008. PP. 10-17, v.a. P. 13 Fn. 4 und P. 13: “A mechanism is a structure performing a function in virtue of its component parts, component operations, and their organization. The orchestrated functioning of the mechanism is responsible for one or more phenomena.”

S. z.B. auch W. BECHTEL / M. HERSCHBACH: *Philosophy of the Cognitive Sciences*. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): *Philosophy of the Sciences*. Blackwell. Oxford. 2010. P. 244: “(...) the basic idea is that a mechanism consists of component parts which perform different operations and that these parts are so organized and the operations orchestrated that the whole mechanism, in the appropriate context, realizes the phenomenon of interest.”

S. z.B. auch C. CRAVER: *Explaining the Brain. Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2007. PP. 2-9, v.a. P. 5 Fn. 6 und P. 5: “(...) a mechanism (...) is a set of entities and activities organized such that they exhibit the phenomenon to be explained.”

Zum Begriff des sog. “information processing mechanism” s. z.B. W. BECHTEL: *Constructing a Philosophy of Science of Cognitive Science*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 1. 2009. PP. 553-56.

Zum Begriff einer sog. „mechanistischen Erklärung“ (engl. “mechanistic explanation”) s. z.B. W. BECHTEL: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. Routledge. London. 2008. PP. 10-17 – C. CRAVER: *Explaining the Brain. Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2007. PP. 107-12 – W. BECHTEL: *Constructing a Philosophy of Science of Cognitive Science*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 1. 2009. PP. 552-53.

16 S. z.B. H. STROHNER: *Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft*. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 34-35.

1.12 Da angesichts des Forschungsumfangs eine Aufgabenverteilung unter verschiedenen Subdisziplinen der Kognitionswissenschaft vorgenommen worden war, kann man in Anlehnung an H. STROHNER¹⁷ und B. von ECKARDT¹⁸ sechs klassische Subdisziplinen benennen:¹⁹

1. die Kognitive Psychologie (engl. "cognitive psychology"),
2. die Kognitiven Neurowissenschaften (engl. "cognitive neurosciences"), bestehend aus der medizinischen Neuropsychologie (engl. "medical neuropsychology") und der (kognitiven) Neurologie (engl. "(cognitive) neurology"), der Neurophysiologie (engl. "neurophysiology"), der (kognitiven) Neurobiologie (engl. "(cognitive) neurobiology") und der (kognitiven) Neuropsychologie (engl. "(cognitive) neuropsychology"),
3. die Kognitive Linguistik (engl. "cognitive linguistics") bzw. die Psycholinguistik (engl. "psycholinguistics"),
4. die Kognitive Anthropologie (engl. "cognitive anthropology"),
5. die Neurophilosophie (engl. "neurophilosophy"), und vor allem
6. die Neuroinformatik (engl. "neuroinformatics") und die Künstliche Intelligenz (KI)-Forschung (engl. "Artificial Intelligence (AI) Research").

1.13 Damit eine Integration dieser Subdisziplinen zu einer homogenen Disziplin der Kognitionswissenschaft erreicht werden kann, wird man sich um eine wissenschaftstheoretische Reflexion in Bezug auf eine Vereinheitlichung der kognitionswissenschaftlichen Terminologie und Method(-ologi)-e zu bemühen haben.²⁰

17 S. H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 10-14.

18 S. B. von ECKARDT: Cognitive Science: Philosophical Issues. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 553-54.

19 Einen einführenden Überblick über die verschiedenen Subdisziplinen bietet z.B. C.P. SOBEL: The Cognitive Sciences. An Interdisciplinary Approach. Mayfield. Mountain View/CA. 2001 – N.A. STILLINGS / S.E. WEISLER / C.H. CHASE / M.H.FEINSTEIN / J.L. GARFIELD / E.L. RISSLAND: Cognitive Science: An Introduction. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MASS. 1995 – H.A. SIMON / C.A. KAPLAN: Foundations of Cognitive Science. In: M.I. POSNER (Ed.): Foundations of Cognitive Science. MIT Press. Cambridge/ MASS. 1989. PP. 2-7.

20 Eingehend zur kognitionswissenschaftlichen Method(-ologi)-e s. z.B. W. BECHTEL: Multiple Levels of Inquiry in Cognitive Science. Psychological Research. Vol. 52. No. 2-3. 1990. PP. 271-81 (dt. Multiple Ebenen der Analyse in der Kognitionswissenschaft. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 1- 27).

Einführend zur kognitionswissenschaftlichen Method(-ologi)-e s. z.B. N.A. STILLINGS / S.E. WEISLER / C.H. CHASE / M.H.FEINSTEIN / J.L. GARFIELD / E.L. RISSLAND: Cognitive Science: An Introduction. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MASS. 1995. PP. 2-11 – P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 7-19 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 14-20 – G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Cognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 59-63 – B. von ECKARDT: What is Cognitive Science? MIT Press. Cambridge/MASS. 1993. PP. 303-39.

Zu den Methoden in den Subdisziplinen der Kognitionswissenschaft s. P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 7-10.

Zu einer einheitlichen kognitionswissenschaftlichen Terminologie i.S. der (dynamischen) System-

Was die method(-olog-)ische Analyse eines kognitiven Phänomens betrifft, be-
ruft sich die h.M.²¹ in der Literatur auf den U.S.-amerikanischen Mathematiker
und (Neuro-)Informatiker David MARR²², der vorgeschlagen hatte, drei allgemei-
ne Ebenen der kognitionswissenschaftlichen Analyse zu unterscheiden ("The Tri-
Level-Hypothesis"²³), u.z.:

- (1) die sog. „komputationale Ebene“ (engl. "computational level"), die eine se-
mantische, theoretisch-abstrakte Analyse eines bestimmten kognitiven Problems
zum Gegenstand hat, das anhand einer bestimmten (kognitiven) Kompetenz
des (neuro-)kognitiven (Informationsverarbeitungs-)Systems gelöst werden soll,
im vorliegenden Fall das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general)
binding problem") in den Kognitions- und Neurowissenschaften,
- (2) die sog. „algorithmische Ebene“ (engl. "algorithmic level"), bei der man sich
mit der Frage beschäftigt, welche mathematisch-formale Struktur eines Algorith-
mus kann im Rahmen einer (mechanistischen²⁴) sog. „Funktionalanalyse“ (engl.
"functional analysis")²⁵ dazu verwendet wird, damit das betreffende (Informa-

theorie s. z.B. H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft.
Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 22-38.

S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.2.

- 21 S. z.B. M.R.W. DAWSON: Computer Modeling of Cognition: Levels of Analysis. In: L. NADEL (Ed.):
Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and To-
kyo. 2003. PP. 635-38 – M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers
Inc. Malden/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998. PP. 66-101, 102-52, 198-242, 288-98,
v.a. P. 288 – A.Y. HOUNG: Philosophical Issues about Levels of Analysis. In: L. NADEL (Ed.): Ency-
clopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo.
2003. PP. 852-55 verweist zusätzlich auch auf die ähnliche Einteilung der Analyseebenen bei Z.W.
PYLYSHYN: Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science. 2nd Ed. MIT
Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1985. PP. 23-24, 28-32 in "semantic" or "representational
level", "symbol-processing" or "functional level" and "physical level".
S. auch die Einteilung der Analyseebenen bei H.A. SIMON: Computational Models: Why Build
Them? In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group.
London, New York and Tokyo. 2003. PP. 621-23 in "knowledge level", "symbolic level" and
"neural level" und bei N.A. STILLINGS / S.E. WEISLER / C.H. CHASE / M.H.FEINSTEIN / J.L. GARFIELD /
E.L. RISSLAND: Cognitive Science: An Introduction. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MASS. 1995.
PP. 2-11 in "semantic" oder "knowledge level analysis", "formal (information)" oder "repre-
sentational analysis" und in "physical level analysis".
S. auch T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press.
1996. PP. 20-24, 27-28.
- 22 S. D. MARR: Vision. A Computational Investigation into Human Representation and Processing of
Visual Information. W.H. Freeman and Company. San Francisco. 1982. PP. 24-25: "At one ex-
treme, the top level, is the abstract computational theory of the device [= complex information-
processing system], in which the performance of the device is characterized as a mapping from
one kind of information to another, the abstract properties of this mapping are defined pre-
cisely, and its appropriateness and adequacy for the task are demonstrated. In the center is the
choice of representation for the input and output and algorithm to transform one into the other.
At the other extreme are the details of how the algorithm and representation are realized physi-
cally – the detailed computer architecture, so to speak."
- 23 S. M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Malden/MA,
Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998. P. 288.
- 24 Zum Begriff des sog. „(mentalen bzw. kognitiven) Mechanismus“ (engl. "(mental / cognitive) me-
chanism") s. die Ausführungen in Kap. 1.12, Fn. 15.
- 25 Zum Begriff der sog. „Funktionalanalyse“ (engl. "functional analysis") in der Kognitionswissen-
schaft s. z.B. M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Mal-

tionsverarbeitungs-)Problem, hier eben das Bindungsproblem, bestmöglichst gelöst werden kann, im vorliegenden Fall anhand von bestimmten integrativen (Synchronisations-)Mechanismen, z.B. in Form von Vektor- und Tensor- oder Attraktorkonstruktionen, den dazugehörigen Differentialgleichungssystemen oder in Form von Oszillationsfunktionen, und

(3) die sog. „implementationale Ebene“ (engl. “implementational level”) behandelt schließlich die physischen, d.h. die anatomisch-physiologischen oder physikalisch-technischen Faktoren, die gegeben sein müssen, damit die funktionalen mathematischen Prozeduren und Mechanismen implementiert werden können, im vorliegenden Fall realisiert in konnektionistischen Architekturmodellen mit den dementsprechenden neuronalen Aktivierungs-, Propagierungs- und Lernfunktionen.

Eine der wichtigsten Methoden der Realisation von (Architektur-)Modellen in der Kognitionswissenschaft, die vor allem im Bereich der sog. „Künstlichen Intelligenz (KI)“ (engl. “Artificial Intelligence (AI)”) ²⁶ eingesetzt wird, besteht in der sog. „Computersimulation“ (engl. “computer simulation”) ²⁷, d.h. man versucht mit Hilfe von computergenerierten Modellen und Simulationen menschliche Kognitionsprozesse nachzubilden und zu erklären. Dabei ist das Konzept der internen sog. (mentalen) Repräsentation (engl. “(mental) representation”) ²⁸ für die kognitive Modellierung (engl. “cognitive modeling”) ²⁹ in einer Kognitionstheorie von grundlegender Bedeutung: Während in der sog. „symbolorientierten Klassischen Künstlichen Intelligenz“, dem Symbolismus, Repräsentationen als syntaktisch

den/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998. PP. 102-110, 153-97, v.a. PP. 160-68 mit Hinweis auf R. CUMMINS: Functional Analysis. Journal of Philosophy. Vol. 72. 1975. PP. 741-64 und R. CUMMINS: The Nature of Psychological Explanation. MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1983. S. auch D.J. KRIEGER: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. Fink. München. 1996. S. 18-20.

26 Eingehend s. z.B. J. HAUGELAND: Artificial Intelligence: The Very Idea. 7. Aufl. The MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1985 – M.H. BICKHARD / L. TERVEEN: Foundational Issues in Artificial Intelligence and Cognitive Science: Impasse and Solution. Elsevier Scientific. New York. 1995 – F. IIDA et al.: Embodied Artificial Intelligence. Springer-Verlag. 2004.

Einführend s. z.B. R. SUN: Artificial Intelligence. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA., Oxford/UK. 1998. PP. 341-51 – R. SUN: Artificial Intelligence. Connectionist and Symbolic Approaches. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Vol. 2. Pergamon/Elsevier Science. Oxford. 2001. PP. 783-89.

27 S. z.B. G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Kognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 61-63.

28 S. Fn. 13.

29 S. z.B. J.L. McCLELLAND: Cognitive Modeling. Connectionist. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 137-41 – R.L. LEWIS: Cognitive Modeling, Symbolic. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 141-43 – D.C. PLAUT: Connectionist Modeling. In: A. KASDIN (Ed.): Encyclopedia of Psychology. Vol. 2. American Psychological Association and Oxford University Press. Washington/DC, New York. 2000. PP. 265-68 – M.R.W. DAWSON: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Malden/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998. PP. 13-35, 36-64, v.a. P. 65.

S. auch allgemein hierzu H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verl. Opladen. 1995. S. 16-18 – U. SCHMID / M.Chr. KINDSMÜLLER: Kognitive Modellierung. Eine Einführung in die logischen und algorithmischen Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 24-26, 323-33.

strukturierte Symbole betrachtet werden, wird in der sog. „subsymbolorientierten ‚Neu(-er-)en‘ Künstlichen Intelligenz“³⁰, dem Konnektionismus, der Begriff der Repräsentation auf dynamische künstliche neuronale Netzwerke angewendet.³¹ Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen dem Symbolismus und dem Konnektionismus bildet dabei die jeweilige modelltechnische Realisation von Information(-sverarbeitung)³², m.a.W. die Beantwortung der Frage: Wie funktioniert die intelligente Informationsverarbeitung des Menschen?

1.14 Seit spätestens der Mitte der neunziger Jahre des 20. Jhdts wird dabei in der am Konnektionismus orientierten Kognitionswissenschaft³³ bei der Analyse von adaptiven, selbstorganisierten (neuro-)kognitiven Systemen und der entsprechenden Entwicklung von kognitiven (Neuro-)Architekturen in zunehmendem Maße die Methoden und Konzepte aus der (mathematischen) Dynamischen Systemtheorie (engl. “Dynamical Systems Theory (DST)“)³⁴ eingesetzt, u.a. basierend auf nicht-linearen Differentialgleichungssystemen, die die kontinuierliche Selbstorganisations-Dynamik der komplexen neuronalen Informationsverarbeitung im Rahmen der (menschlichen) (Neuro-)Kognition angemessener modellieren können. Vor allem wird betont, daß der Zeitaspekt von essentieller Bedeutung für das vertiefte Verständnis der (menschlichen) Kognition sei, d.h., daß Kognition *in* der kontinuierlichen (Real-)Zeit von prozessualen Ereignissen stattfindet, sodaß sich dies anhand von quantitativen Zeitvariablen in dynamischen Modellen widerspiegelt, sowie in einem transienten, dynamischen Repräsentationsformat³⁵, was auch vereinbar sei mit einem dynamisch-mechanistischen

30 S. z.B. G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Kognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 58-59.

31 S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 2.

32 S. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/ Mering. 2001. S. 74.

33 S. hierzu eingehend z.B. T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 1-43 – W. BECHTEL: Representations and Cognitive Explanations: Assessing the Dynamicist Challenge in Cognitive Science. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. PP. 295-318 – T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43, v.a. PP. 30-33.

S. hierzu einführend z.B. T. van GELDER: Dynamic Approaches to Cognition. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1999. PP. 243-45 – P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 191-204 – H. STROHNER: Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verlag. Opladen. 1995. S. 27-33, 182-85 - Einen eingehenden Überblick hierzu geben z.B. R.D. BEER: Dynamical Approaches to Cognitive Science. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 4. 2000. PP. 91-99 – M. Van LEEUWEN: Questions for the Dynamicist: The Use of Dynamical Systems Theory in the Philosophy of Cognition. Minds and Machines. Vol. 15. No. 3-4. 2005. PP. 271-333, v.a. PP. 310-11.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.27.

34 S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.2.

35 S. z.B. T. van GELDER: Dynamic Approaches to Cognition. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1999. P. 245: “Dynamicists and classicists also diverge over the general nature of cognition and cognitive agents. The pivotal issue here is probably the role of time. Although all cognitive scientists under-

Erklärungsansatz in der (Neuro-)Kognitionswissenschaft.³⁶

stand cognition as something that happens over time, dynamicists see cognition as being *in* time, that is, as an essentially temporal phenomenon. This is manifested in many ways. The time variable in dynamical models is not a mere discrete order, but a quantitative, sometimes continuous approximation to the real time of natural events. Details of timing (durations, rates, synchronies, etc.) are taken to be essential to cognition itself rather than incidental details. Cognition is seen not as having a sequential cyclic (sense-think-act) structure, but rather as a matter of continuous and continual coevolution. The subtlety and complexity of cognition is found not *at* a time in elaborate static structures, but rather *in* time in the flux of change itself."

36 S. z.B. W. BECHTEL: Representations and Cognitive Explanations: Assessing the Dynamicist Challenge in Cognitive Science. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. PP. 295-318.

S. hierzu auch die Ausführungen in Fn. 15.

1.2 (GENERELLE) THEORIE UND MODELLKONZEPTIONEN DER (NICHTLINEAREN) DYNAMISCHEN SYSTEME³⁷

1.20 Da in der vorliegenden Arbeit – im Rahmen der algorithmischen Analyseebene i.S. D. MARR's³⁸ – der Konnektionismus (engl. "connectionism")³⁹ mit der Theorie der (künstlichen) neuronalen Netz(-werk-)e (KNN) (engl. "(Artificial) Neural Net(-work) (ANN)")⁴⁰ von der mathematischen Modelltypologie her zu den (nichtlinearen) dynamischen Systemen gehörend betrachtet wird⁴¹, werden vorab die Modelle, Methoden, Konzepte und Prinzipien der (allgemeinen) Systemtheorie und der Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme einschließlich des Selbstorganisationskonzepts – als ein Forschungszweig innerhalb der Kognitionswissenschaft – in Grundzügen kurz dargestellt:

37 Dieses Kapitel ist eine stark überarbeitete Fassung der Kapitel 0.1 und 6.40-6.42 meiner Masterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

38 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.13, 2.27.1.

39 Da im weiteren Verlauf der Arbeit vorwiegend (Neuro-)Architekturen analysiert werden, die dieser Klassifikation zuzurechnen sind, wird dies damit zum Ausdruck gebracht, daß dann i.d.R. der Begriff des sog. „Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus“ verwendet wird.

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 2.2.

40 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 2.211.

41 S. z.B. P.W. MUNRO / J.A. ANDERSON: Tools for Connectionist Modeling: The Dynamical Systems Methodology. Behavior Research Methods, Instruments, and Computers. Vol. 20. 1988. PP. 276-81, v.a. PP. 276-81 – H.R. WILSON: Spikes, Decisions, and Actions: The Dynamical Foundations of Neuroscience. Oxford University Press. New York. 1999. PP. 1-3, 279-82 – T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. Chap. 4: Cognitive Systems as Dynamical Systems: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. MIT Press. 1996. PP. 45-69 – T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43, v.a. PP. 27, 29, 30-33 – P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 1-23, v.a. P. 6 – B. KOSKO: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992. PP. 14-17 – A. CLARK: Being there: Putting Brain, Body and World together again. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 97-102, 113-23 – H. LEITGEB: Interpreted Dynamical Systems and Qualitative Laws: From Neural Network to Evolutionary Systems. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 195-98 – T. van GELDER: Dynamic Approaches to Cognition. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 245.

S. auch H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 167 und H. JAEGER: Dynamische Systeme in der KI und ihren Nachbarwissenschaften. Arbeitspapiere der GMD 925. St. Augustin. 1995. S. 25-26, der die wechselseitige Abbildbarkeit von rekurrenten neuronalen Netzwerken und dynamischen Systemen mit reellwertigen Systemgrößen betont.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.27.

1.21 (GENERELLE) SYSTEMTHEORIE UND SYSTEMANALYSE

1.210 Unter der sog. „(allgemeinen) Systemtheorie“ (engl. “(general) system theory”)⁴² versteht man – ganz allgemein – ein transdisziplinäres Forschungsprogramm, mit ersten Ansätzen in den zwanziger Jahren des 20. Jhdts und beginnend seit den vierziger, fünfziger und sechziger Jahren des 20. Jhdts, das mathematische (L.A. ZADEH), naturwissenschaftliche (L. von BERTALANFFY), ingenieurwissenschaftliche (K. KUPFMÜLLER) und sozialwissenschaftliche Forschungslinien umfaßt, und dabei auch Forschungsströmungen wie z.B. die der sog. „Kybernetik“ (engl. “cybernetics”) i.S. N. WIENER's mit aufgreift.^{43,44}

42 Grundlegend s. z.B. bei L. von BERTALANFFY: An Outline of General System Theory. *British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 1. 1950 (2010). PP. 134-65, v.a. PP. 139-43 – L. von BERTALANFFY: The Theory of Open Systems in Physics and Biology. *Science*. Vol. 111. 1950. PP. 23-29 – W.R. ASHBY: Design for a Brain. Chapman and Hall. London. 1952 – L. von BERTALANFFY: General System Theory. Foundations, Development, Applications. George Braziller. New York. 1968 – A.D. HALL / R.E. FAGEN: Definition of System. In: W. BUCKLEY (Ed.): Modern System Research for the Behavioral Scientist. Aldine Publishing Company. Chicago. 1968. PP. 81-92 – G.J. KLIR: An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969 – L. von BERTALANFFY: Zu einer allgemeinen Systemlehre. In: K. BLEICHER: Organisation als System. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 31-44 – L. von BERTALANFFY: Perspectives on General System Theory. *Scientific-Philosophical Studies*. George Braziller. New York. 1975. PP. 127-36, 149-69 – A. RAPOPORT: Allgemeine Systemtheorie. Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988 – E. LÁSZLÓ: The Interconnected Universe. World Scientific. Singapore. 1995.

Einführend s. z.B. E. JANTSCH: System, Systemtheorie. In: H. SEIFFERT / G. RADNITZKY: Handlexikon zur Wissenschaftstheorie. Ehrenwirth Verl. München. 1989. S. 329-38 – K. STEINBACHER: System/Systemtheorie. In: H.J. SANDKÜHLER: Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften. Bd. 4. Felix Meiner Verlag. Hamburg. 1990. S. 500-506.

Eine an der Mathematik orientierte Einführung bietet z.B. L.A. ZADEH: The Concept of System, Aggregate, and State in System Theory. In: L.A. ZADEH / E. POLAK (Eds.): System Theory. McGraw-Hill. New York. 1969. PP. 3-42, der eine abstrakte, mengentheoretische Version der Systemtheorie entworfen hat.

Eine an den Naturwissenschaften orientierte, allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verl. 1979, 1992. S. 64-67.

Eine an der Wissenschaftstheorie und Philosophie sowie an den Sozial- bzw. Kulturwissenschaften orientierte Einführung bieten z.B. H. LENK: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 239-69 – G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 49-103 – G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 9-49 – Fr. HÄNDLE / St. JENSEN: Einleitung der Herausgeber. In: Fr. HÄNDLE / St. JENSEN (Hrsg.): Systemtheorie und Systemtechnik. Nymphenburger Verlagshandlung. München. 1974. S. 7-50 – St. JENSEN: Systemtheorie. Verl. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983. S. 7-11, 22-37 – H. SEIFFERT: Einführung in die Wissenschaftstheorie. Bd. 3: Handlungstheorie – Modallogik – Ethik – Systemtheorie. Beck Verl. München. 1985. S. 95-141, v.a. S. 124-33 – D.J. KRIEGER: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. Fink. München. 1996. S. 11-53.

43 Zu den einzelnen Modellkonzeptionen s. die Ausführungen in Kap. 1.24 und 1.25.

44 Eingehend zu den geschichtlichen Wurzeln der modernen Systemtheorie siehe z.B. L. von BERTALANFFY: The History and Status of General Systems Theory. *The Academy of Management Journal*. Vol. 15. 1972. PP. 407-10 – L. von BERTALANFFY: Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. In: R. KURZROCK (Hrsg.): Systemtheorie. Colloquium Verl. Berlin. 1972. S. 17-28 – Ch. FRANÇOIS: Systemics and Cybernetics in a Historical Perspective. *Systems Research and Behavioral Sci-*

1.211 Der Grundbegriff der Systemtheorie, der des sog. „(offenen) Systems“ (engl. “(open) system”)⁴⁵, abgeleitet von dem griechischen Wort “σύστημα (sýstēma)”⁴⁶, wird im allgemeinen anhand folgender abstrakter (Minimal-)Definition bestimmt: Ein System, als eine von seiner Umwelt abgrenzbare, funktional geschlossene Entität, besteht erstens aus einer Menge (engl. “set”), von Gegenständen oder (Sach-)Bestandteilen, m.a.W. von sog. „(System-)Elemen-

ence. Vol. 16. 1999. PP. 203-19, v.a. P. 207 – G.J. KLIR: An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969. PP. 97-103 – Kl. KORNWACHS: Nichtklassische Systeme und das Problem der Emergenz. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 182-202 – G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 9-10 – St. JENSEN: Systemtheorie. Verl. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983. S. 16-19 – M. MATTHIES: Einführung in die Systemwissenschaft. Manuskript. WS 2002/03. From: <http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/-syswi/skript10.pdf>. S. 6-8. Einführend zu den geschichtlichen Wurzeln der modernen Systemtheorie siehe z.B. E. JANTSCH: System, Systemtheorie. In: H. SEIFFERT / G. RADNITZKY: Handlexikon zur Wissenschaftstheorie. Ehrenwirth Verl. München. 1989 S. 331-35 – K. STEINBACHER: System/Systemtheorie. In: H.J. SANDKÜHLER: Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften. Bd. 4. Felix Meiner Verl. Hamburg. 1990. S. 500-502.

Eine Sammlung von Rezensionen der wichtigsten Originaltexte bietet z.B. D. BAECKER: Schlüsselwerke der Systemtheorie. Verl. für Sozialwiss. Wiesbaden. 2005.

45 Grundlegend s. z.B. bei A.D. HALL / R.E. FAGEN: Definition of System. In: W. BUCKLEY (Ed.): Modern System Research for the Behavioral Scientist. Aldine Publishing Company. Chicago. 1968. PP. 81-92, v.a. P. 18: “A system is a set of objects together with relationships between the objects and between their attributes.”

Eingehend s. z.B. L. von BERTALANFFY: An Outline of General System Theory. British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1. 1950 (2010). PP. 143-46 – L. von BERTALANFFY: The Theory of Open Systems in Physics and Biology. Science. Vol. 111. 1950. PP. 23-25 – W.R. ASHBY: Design for a Brain. Chapman and Hall. London. 1952. P. 2/5 – L. von BERTALANFFY: General System Theory. Foundations, Development, Applications. George Braziller. New York. 1968. PP. 38, 54-66, 124-31, 141-45, 145-49, 149-50 – G.J. KLIR: An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969. PP. 50-61 – L. von BERTALANFFY: Zu einer allgemeinen Systemlehre. In: K. BLEICHER: Organisation als System. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 32-34 – L. von BERTALANFFY: Perspectives on General System Theory. Scientific-Philosophical Studies. George Braziller. New York. 1975. PP. 127-36, 159, 164-69 – A. RAPOPORT: Allgemeine Systemtheorie. Wesentliche Begriffe und Anwendungen. Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988. S. 1, 24, 37, 78, 120 – L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT: General System Theory. In: L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT (Eds.): General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences. Vol. 1. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956. PP. 3-5.

Einführend s. z.B. E. JANTSCH: System, Systemtheorie. In: H. SEIFFERT / G. RADNITZKY: Handlexikon zur Wissenschaftstheorie. Ehrenwirth Verl. München. 1989. S. 332 – K. STEINBACHER: System/Systemtheorie. In: H.J. SANDKÜHLER: Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften. Bd. 4. Felix Meiner Verl. Hamburg. 1990. S. 500 – E. JANTSCH: The Unifying Paradigm Behind Autopoiesis, Dissipative Structures, Hyper- and Ultracycles. In: M. ZELNY (Ed.): Autopoiesis, Dissipative Structure, and Spontaneous Social Orders. Westview Press. Boulder/CO. 1980. PP. 81-87.

Einführend, orientiert an den Naturwissenschaften, s. z.B. G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 5-10 – E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verl. 1979, 1992. S. 64-67.

Einführend, orientiert an der Wissenschaftstheorie und Philosophie sowie an den Sozial- bzw. Kulturwissenschaften, s. z.B. H. LENK: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 240-41 – G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie.

ten“ (engl. “(system) elements”), zwischen denen und deren Merkmalen bzw. (Sach-)Eigenschaften mit den entsprechenden Merkmalsausprägungen (wechselseitige) (Sach-)Beziehungen bestehen. Daher besteht ein System zweitens aus einer Menge von sog. „(System-)Relationen“ (engl. “(system) relations”) bzw. „(System-)Operationen“ (engl. “(system) operations”), die die Systemelemente auf eine bestimmte Weise miteinander verknüpfen, wobei die räumliche, zeitliche oder kausal-funktionale Anordnung der Elemente zueinander als sog. „(System-)Struktur“ (engl. “(system) structure”)⁴⁷ oder „(System-)Konfiguration“ (engl. “(system) configuration”) bezeichnet wird. Unter

Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 54-67 – G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 14-19 – Fr. HÄNDLE / St. JENSEN: Einleitung der Herausgeber. In: Fr. HÄNDLE / St. JENSEN (Hrsg.): Systemtheorie und Systemtechnik. Nymphenburger Verlagshandlung. München. 1974. S. 27-36 – St. JENSEN: Systemtheorie. Verl. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983. S. 28-37 – H. SEIFFERT: Einführung in die Wissenschaftstheorie. Bd. 3: Handlungstheorie – Modallogik – Ethik – Systemtheorie. Beck Verl. München. 1985. S. 125 – H. FUCHS: Systemtheorie. In: Kn. BLEICHER: Organisation als System. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 47-57.

Damit besitzt man nach G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 67 und G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 14-31 einen einheitlichen Begriff des Systems, der alle drei fundamentalen Systemkonzepte, das strukturelle, das funktionale und das Hierarchie-Konzept in sich vereinigt.

46 Die dt. Übersetzung von griech. "sýstēma (syn + histanai)", wird angegeben mit: Zusammenstellung, Zusammenhang, Zusammengehöriges, Zusammennahme, Zusammenfügung; Gebilde, Vereinigung, Gesamtheit, Bildung; auch: allgemeine Gliederung, Aufbau, Ordnungsprinzip, einheitlich geordnetes Ganzes.

S. W. GEMOLL / K. VRETSKA: Gemoll. Griechisch-deutsches Schul- und Handwörterbuch. 10. Aufl. Oldenbourg Schulbuchverlag GmbH. 2006 – H. MENGE (Hrsg.): Langenscheidts Großwörterbuch Altgriechisch. Altgriechisch – Deutsch. 30. Aufl. Langenscheidt. Berlin u.a. 1913, 2001 – H. MENGE (Hrsg.): Langenscheidt. Taschenwörterbuch Altgriechisch. Teil 1. Altgriechisch – Deutsch. Langenscheidt KG. Berlin u.a. 1986, 1993.

S. auch z.B. Kl. KORNWACHS: Nichtklassische Systeme und das Problem der Emergenz. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 182 – K. GLOY: Systemtheorie – das neue Paradigma? In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 228.

Zur Geschichte des Begriffs des Systems s. z.B. St. JENSEN: Systemtheorie. Verl. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983. S. 14-16 – H. SEIFFERT: Einführung in die Wissenschaftstheorie. Bd. 3: Handlungstheorie – Modallogik – Ethik – Systemtheorie. Beck Verl. München. 1985. S. 97-102.

47 Der Begriff der sog. „(mathematischen) Struktur“ (engl. “(mathematical) structure”) ist dabei in der modernen Mathematik und Physik seit dem 20. Jhdt. von grundlegender Bedeutung: Seit den dreißiger Jahren des 20. Jhdt.'s ist z.B. vom Autorenkollektiv mit dem Pseudonym Nicolas BOURBAKI der Versuch einer Vereinheitlichung der Mathematik unternommen worden, gegründet auf der axiomatischen Methode des Mathematikers David Hilbert, wobei der Strukturbegriff zentral ist (sog. „mathematischer Strukturalismus“).

Eingehend s. z.B. J.A. DIEUDONNÉ: The Work of Nicolas Bourbaki. American Mathematical Monthly. Vol. 77. 1970. PP. 134-45.

Einführend s. z.B. H. WUSSING: 6000 Jahre Mathematik. Eine kulturgeschichtliche Zeitreise. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2009. S. 483-87 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 13-17 – L.B. PUNTEL: Struktur und Sein. Mohr Siebeck. Tübingen. 2006. S. 234-38.

der sog. „(System-)Funktion“ (engl. “(system) function”) versteht man die Charakteristik aller ablaufenden Beziehungsmuster, d.h. das Gesamtverhalten des Systems und dessen Leistung(-szustände) in seiner Umgebung. Die Elemente eines Systems können wiederum als Systeme, die sog. „Subsysteme“ (engl. “subsystems”), das System selbst aber kann als ein Element eines umfassenderen Systems, des sog. „Supra-Systems“ (engl. “suprasystem”) oder „Cosystems“ (engl. “co-system”) aufgefaßt werden, sodaß eine Systeminterpretation auf verschiedenen Stufen einer solchen sog. „Systemhierarchie“ (engl. “system hierarchy”) vorgenommen werden kann. Der Begriff des Supra-Systems dient dabei als Bezeichnung für die Klasse aller Systeme, mit denen das betrachtete System, das sog. „Referenzsystem“ (engl. “reference system”), Interaktionsprozesse unterhält, also die sog. „(System-)Umgebung“ (engl. “(system) environment”) oder die Umwelt des Systems.

1.212 Im deutschen Sprachraum wird bisweilen von der Systemtheorie i.e.S. noch die sog. „Systemanalyse“ (engl. “system analysis”)⁴⁸ und die ingenieurwissenschaftlich orientierte sog. „Systemtechnik“⁴⁹ abgegrenzt.⁵⁰

48 S. z.B. D.M. IMBODEN / S. KOCH: Systemanalyse. Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme. 1. Aufl. 3. korrigierter Nachdruck. Springer. Berlin u.a.. 2008 – A. HÄUSLEIN: Systemanalyse. Grundlagen, Techniken, Notierungen. VDE-Verl. Berlin, Offenbach. 2003 – M. MATTHIES: Einführung in die Systemwissenschaft. Manuskript. WS 2002/03. S. 9-14, 35-51. From: <http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/syswi/skript10.pdf>.

S. auch G.J. KLIR: An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969. PP. 178-211.

49 S. z.B. Th. FREY / M. BOSSERT: Signal- und Systemtheorie. 2. korr. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden. 2008 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 2: Mehrdimensionale, adaptive und nichtlineare Systeme. Oldenbourg. München, Wien. 1998.

Einführend s. z.B. C. KOLO / Th. CHRISTALLER / E. PÖPPEL: Bioinformation. Problemlösungen für die Wissensgesellschaft. Physica-Verlag. Heidelberg. 1999. S. 70-71.

50 S. M. MATTHIES: Einführung in die Systemwissenschaft. Manuskript. WS 2002/03. S. 3-6. From: <http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/syswi/skript10.pdf>.

1.22 (GENERELLE) THEORIE DER (NICHTLINEAREN) DYNAMISCHEN SYSTEME

1.220 Die sog. „Dynamische Systemtheorie“ (engl. “Dynamic Systems Theory (DST)”) ⁵¹ beschreibt mit ihren mathematischen Konzepten und Modellen anhand von ((nicht-)linearen) Differentialgleichungen das Verhalten von komplexen dynamischen Systemen, u.a. auch das neurale System von Neuronen-

-
- 51 Grundlegend zur Dynamischen Systemtheorie in der Mathematik s. z.B. G.D. BIRKHOFF: *Dynamical Systems*. 1. Print of Rev. Ed. AMS. Providence/RI. 1927, 1966.
Einführend zur Dynamischen Systemtheorie in der Mathematik s. z.B. G. TESCHL: *Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems*. American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011 – D. HINRICHSSEN / A.J. PRITCHARD (Eds.): *Mathematical Systems Theory I. Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010 – L. PERKO: *Differential Equations and Dynamical Systems*. 3rd Ed. Springer. New York u.a. 2009 – J. GUCKENHEIMER / Ph. HOLMES: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*. Rev. and Corr. 3rd Printing. Springer. New York. 1990 – A. KATOK / B. HASSELBLATT: *Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems*. Cambridge University Press. Cambridge. 1995 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: *Dynamische Systeme*. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994 – J.L. CASTI: *Dynamical System and Their Applications*. Linear Theory. Academic Press. New York u.a. 1977 – J.L. CASTI: *Nonlinear System Theory*. Academic Press. Orlando/FLO, London. 1985 – D. HINRICHSSEN: *Introduction to Mathematical Systems Theory*. Lecture Notes for a Joint Course at the Universities of Warwick and Bremen. Zentraldruckerei der Universität Bremen. Bremen. 1981, 1988 – R.L. DEVANEY: *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Second Edition. Addison-Wesley. New York u.a. 1989 – J.C. ROBINSON: *Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos*. 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009.
Einführend zur Dynamischen Systemtheorie in der Physik, Informatik und Neurowissenschaft s. z.B. Chr. GERTHSEN: *Gerthsen Physik*. 20. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 963-78 – W. METZLER: *Nichtlineare Dynamik und Chaos*. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998 – E.R. SCHEINERMAN: *Invitation to Dynamical Systems*. Department of Mathematical Sciences. The Johns Hopkins University. Internet Version. 2000 – R. DER / J.M. HERRMANN: *Script Dynamical Systems and Autonomous Agents*. Part I: *Theory of Dynamical Systems*. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002 – M. BRIN / G. STUCK: *Introduction to Dynamical Systems*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002.
Einführend zur Dynamischen Systemtheorie in der Psychologie und Kognitionswissenschaft s. z.B. E. THELEN / L.B. SMITH: *Dynamic Systems Theories*. W. DAMON / R.M. LERNER: *Handbook of Child Psychology*. Vol. 1: *Theoretical Models of Human Development*. 6th Ed. John Wiley & Sons. New York. 2006. Chap. 6. PP. 258-312, v.a. PP. 271-76 – H. JAEGER: *Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft*. *Kognitionswissenschaft*. Bd. 5. 1996. S. 152-57 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: *Systemische Psychologie*. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 74-117, v.a. S. 101-17, 121-221 – Gr. SCHÖNER: *Development as Change of Systems Dynamics: Stability, Instability, and Emergence*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2009. PP. 25-31 – T. HORGAN / J. TIENSON: *Connectionism and the Philosophy of Psychology*. Chap. 4: *Cognitive Systems as Dynamical Systems: A Nonclassical Framework for Cognitive Science*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 45-69 – T. HORGAN / J. TIENSON: *Cognitive Systems as Dynamical Systems*. *Topoi*. Vol. 11. 1992. PP. 27-43, v.a. PP. 30-33.
Einen sehr guten Überblick über alle wissenschaftlichen Fachgebiete findet man in KI. MAINZER: *System: An Introduction to Systems Science*. In: L. FLORIDI (Ed.): *The Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information*. Blackwell. Malden/MA. 2004. PP. 28-39 – H. JAEGER: *Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft*. *Kognitionswissenschaft*. Bd. 5. 1996. S. 151-74 m.w.Lit.
Einführend zu den geschichtlichen Wurzeln der modernen Dynamischen Systemtheorie s. z.B. H. JAEGER: *Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft*. *Kognitionswissenschaft*. Bd. 5. 1996.

(-populationen) im Rahmen von neuronalen Netzwerken beim Menschen⁵², die mit ihrer intrinsischen Dynamik diejenigen (Stabilisations-)Mechanismen erzeugen, die bestimmte (System-)Verhaltensmuster entstehen lassen, die mit einem hinreichenden Grad an Stabilität den Störungseinflüssen einer komplexen (System-)Umgebung widerstehen können⁵³, sodaß die Lösung eines Differentialgleichungssystems⁵⁴ eines sog. „neuronalen dynamischen Systems“ (engl. „neuronal dynamical system“)⁵⁵ gegen einen invarianten bzw. (relativ) stabilen (System-)Zustand konvergiert.

1.221 Die formale mathematisch-naturwissenschaftliche (Minimal-)Definition eines dynamischen Systems (engl. „dynamical system“) mit einer großen Anzahl n von Elementen⁵⁶, bestehend

(1) aus einem abstrakten, d -dimensionalen sog. „Phasen-“ bzw. „Zustandsraum“ (engl. „phase space, state space“)⁵⁷ X , dessen d (System-)Varia-

S. 152-54 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994. S. 28-31.

Eingehend zu den geschichtlichen Wurzeln der modernen Dynamischen Systemtheorie aus der Sicht der Elektrotechnik siehe z.B. G. WUNSCH: Geschichte der Systemtheorie. Dynamische Systeme und Prozesse. Akademie-Verlag. Berlin. 1985.

52 S. z.B. M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. V-VI, 1-7, 9-11.

53 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.222.

54 Die mathematische Definition eines Differentialgleichungssystems ist dabei gegeben anhand der folgenden Formeln:

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= f_1(x_1(t), \dots, x_d(t)) \\ &\vdots \\ x_d'(t) &= f_d(x_1(t), \dots, x_d(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

S. hierzu z.B. A.D. HALL / R.E. FAGEN: Definition of System. In: W. BUCKLEY (Ed.): Modern System Research for the Behavioral Scientist. Aldine Publishing Company. Chicago. 1968. P. 25 – L. von BERTALANFFY: An Outline of General System Theory. British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1. 1950 (2010). PP. 143-46 – W.R. ASHBY: Design for a Brain. Chapman and Hall. London. 1952. PP. 243-44.

S. auch R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002. P. 8 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 103-104, 176-90.

55 S. z.B. B. KOSKO: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992. PP. 44-47.

56 Die Anzahl n von (System-)Elementen bestimmt dabei die Anzahl der (Zustandsvektor-)Dimensionen d , d.h. $n = d$, wobei jeweils eine Dimension eine Systemvariable bzw. einen Systemparameter $x_j(t)$ geometrisch „repräsentiert“.

57 Zum Begriff des (System-)Zustandes in der Physik und seiner Beziehung zur Verwendung im Rahmen der TURING-Maschine s. z.B. L.A. ZADEH: From Circuit Theory to System Theory. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. Vol. 50. 1962. Reprinted in: G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 309-23, v.a. PP. 313-16 unter Hinweis auf A.M. TURING: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society. Vol. 2. No. 42. 1936. PP. 230-65.

- blen⁵⁸ $x_1(t), \dots, x_d(t)$ in Form von Vektorkoordinaten⁵⁹ den System(-gesamt-)zustand $x(t)$ in seinem Verlauf mit der Zeit t vollständig beschreiben, und
- (2) aus einer dynamischen (Transformations-)Funktion f , die die Veränderungen aller Zustandsvariablen (engl. "state variables") in der Zeit und damit des System(-gesamt-)zustandes bestimmt, wird demnach im allgemeinen wie folgt als ein Tripel (T, X, f) angegeben⁶⁰, bestehend aus
1. einer Menge T von Zeitparametern mit $T = \mathbb{N}_0, \mathbb{Z}, \mathbb{R}_0^+$ oder \mathbb{R} , wobei sich die Zeit als verallgemeinerter Iterationsindex deuten läßt⁶¹,
 2. einer nichtleeren Menge X , dem Phasen- bzw. Zustandsraum⁶² mit einem

58 Eine (System-)Variable $x_j(t)$ dient dabei der mathematisch-quantitativen Erfassung eines (System-)Elements mit dem Index $j = 1, \dots, d$ bzw. dessen Elementattributen.

S. z.B. A.D. HALL / R.E. FAGEN: Definition of System. In: W. BUCKLEY (Ed.): Modern System Research for the Behavioral Scientist. Aldine Publishing Company. Chicago. 1968. P. 19.

S. auch G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 103.

59 Eine Vektorkoordinate innerhalb des Phasenraums bezeichnet dabei geometrisch einen grundsätzlich einnehmbaren Systemzustand.

60 Eine etwas kompakte mathematische Definition findet sich in TESCHL: Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011. PP. 185-86.

Eine sehr allgemeine und ausführliche mathematische Definition bieten z.B. D. HINRICHSSEN / A.J. PRITCHARD (Eds.): Mathematical Systems Theory I. Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010. PP. 74-78 – D. HINRICHSSEN: Introduction to Mathematical Systems Theory. Lecture Notes for a Joint Course at the Universities of Warwick and Bremen. Zentraldruckerei der Universität Bremen. Bremen. 1981, 1988. PP. 1.1-1.4 – J.L. CASTI: Dynamical System and Their Applications. Linear Theory. Academic Press. New York u.a. 1977. PP. 22-23.

Eine an den Anforderungen der Physik, Informatik und der Neurowissenschaft orientierte Definition bieten W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 7-17, v.a. S. 15-16 – E.R. SCHEINERMAN: Invitation to Dynamical Systems. Department of Mathematical Sciences. The Johns Hopkins University. Internet Version. 2000. PP. 1-4 – R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002. PP. 7-8 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 1-2 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 1.

Die Systemdefinition steht damit in engem Zusammenhang mit der der sog. "algebraischen Struktur" Σ (engl. "algebraic structure") gemäß $\Sigma = \langle A, f_i \rangle$, bestehend aus einer Menge von fundamentalen i -stelligen Operationen f_i bzw. Relationen, die einer nichtleeren Trägermenge A aufgeprägt sind.

S. hierzu z.B. G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 5, 9.

61 S. W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 16.

62 Dieser stellt dabei einen sog. „metrischen Raum“ (engl. "metric space") dar.

Einführend hierzu s. z.B. Kl. JÄNICH: Topologie. 8. Aufl. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a.

2005. S. 10-12 – J. HEINE: Topologie und Funktionalanalysis. Oldenbourg. München, Wien. 2009. S. 3-4 – W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 15.

d -dimensionalen (Zustands-)Vektor $x(t) = x_1(t), \dots, x_d(t)$ des Systems⁶³ mit $x(t) \in \mathbb{R}^d$, und

3. einer (Transformations-)Funktion $f^t: T \times X \rightarrow X$ mit $t \in \mathbb{N}_0, \mathbb{Z}, \mathbb{R}_0^+$ oder \mathbb{R} .

Man unterscheidet nun zwei Modelltypen von dynamischen Systemen, u.z. abhängig davon, ob der Zeitparameter diskret (engl. "discrete") oder kontinuierlich (engl. "continuous") ist⁶⁴:

Im ersten Fall für $t \in \mathbb{N}_0$ oder $t \in \mathbb{Z}_0$ erhält man ein diskretes dynamisches System, das als eine Iteration einer Funktion dargestellt werden kann:

$$x(0) = x_0, \quad (2) \text{ und}$$

$$x(t+1) = f(x(t)) \quad (3)$$

Im zweiten Fall für $t \in \mathbb{R}_0^+$ oder $t \in \mathbb{R}$ erhält man ein kontinuierliches dynamisches System, dessen Dynamik anhand (eines Systems)⁶⁵ von gewöhnlichen Differentialgleichungen (engl. "ordinary differential equations") beschrieben werden kann:

$$x(0) = x_0, \quad (4) \text{ und}$$

$$\dot{x}(t) = F(x(t), t) \quad (5)$$

Ein solches System kann dabei als ein sog. „Vektorfeld“ (engl. "vector field") F^{66} (s. Graphik.01) bzw. als einen sog. „(Phasen-)Fluß“ (engl. "flow") betrachtet

63 Nach H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 154 gibt dabei der Zustandsvektor $x(t) = x_1(t), \dots, x_d(t)$ des Systems an, „welche numerischen Werte zu einem bestimmten Zeitpunkt die beobachteten Systemvariablen einnehmen.“

64 S. z.B. R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002. PP. 7-8 – E.R. SCHEINERMAN: Invitation to Dynamical Systems. Department of Mathematical Sciences. The Johns Hopkins University. Internet Version. 2000. P. 4 – W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 7-17, v.a. S. 15-16 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 1 – TESCHL: Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011. PP. 185-87 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 1-2.

65 Falls ein kontinuierliches dynamisches System mehr als eine Dimension besitzt, d.h. $x \in \mathbb{R}^d$ und $f^d: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$ mit $d > 1$, ist die Gleichung (4) als ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung zu verstehen gemäß:

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= f_1(x_1(t), \dots, x_d(t)) \\ &\vdots \\ x_d'(t) &= f_d(x_1(t), \dots, x_d(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

S. hierzu z.B. R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002. P. 8.

S. auch Fn. 51.

66 Eingehend s. z.B. J. GUCKENHEIMER / Ph. HOLMES: Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Rev. and Corr. 3rd Printing. Springer. New York u.a. 1990. PP. 1-3 – H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 35-37 – G. JETSCHE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme

werden⁶⁷, das anhand von Tangentialvektoren die Bahnen (engl. "curves") der Vektorkoordinaten, die typischen sog. „Trajektorien“ (engl. "trajectories")⁶⁸ oder die sog. „Orbits“ (engl. "orbits"), und damit deren Bewegungen im Zustandsraum während eines zeitlichen Verlaufs beschreibt (sog. „Phasenbild“ bzw. „Phasenportrait“ (engl. "phase portrait")⁶⁹ (s. Graphik.02), sodaß das System eine „zusammenhängende Systemgeschichte, eine ‚Spur in der Zeit‘

und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 26-27 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 15.

S. auch A. NORTON: Dynamics: An Introduction. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 49-52, v.a. P. 50.

Einführend s. z.B. K. KÖNIGSBERGER: Analysis 2. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002. S. 131-76 – Fl. SCHECK: Theoretische Physik 1. Mechanik. Von den Newton'schen Gesetzen zum deterministischen Chaos. 8. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2007. S. 338-42.

Ein sog. „Vektorfeld“ (engl. "vector field") wird nach K. KÖNIGSBERGER: Analysis 2. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002. S. 131 mathematisch wie folgt definiert:

„Unter einem Vektorfeld v auf einer Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ versteht man eine Abbildung, die jedem Punkt $x \in \Omega$ einen Vektor $v(x) \in \mathbb{R}^n$ zuordnet, $v: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$. Ist v eine C^k -Abbildung, so spricht man von einem C^k -Vektorfeld.“

Geometrisch deutet man ein Vektorfeld v dadurch, daß man sich an jedem Punkt $x \in \Omega$ den Vektor $v(x)$ angeheftet denkt; formal: Man bildet die Paare $(x, v(x))$, $x \in \Omega$. Physikalisch deutet man ein Vektorfeld oft als Geschwindigkeitsfeld einer stationären, d.h. zeitunabhängigen Strömung, wobei $v(x)$ der Geschwindigkeitsvektor am Punkt x ist.“

67 Zum Begriff des sog. „(Phasen-)Flusses“ (engl. "(phase) flow") bzw. des „(Vektor-)Stroms“ (engl. "vector stream") s. z.B. G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 24-25 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 14-17 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 19-21.

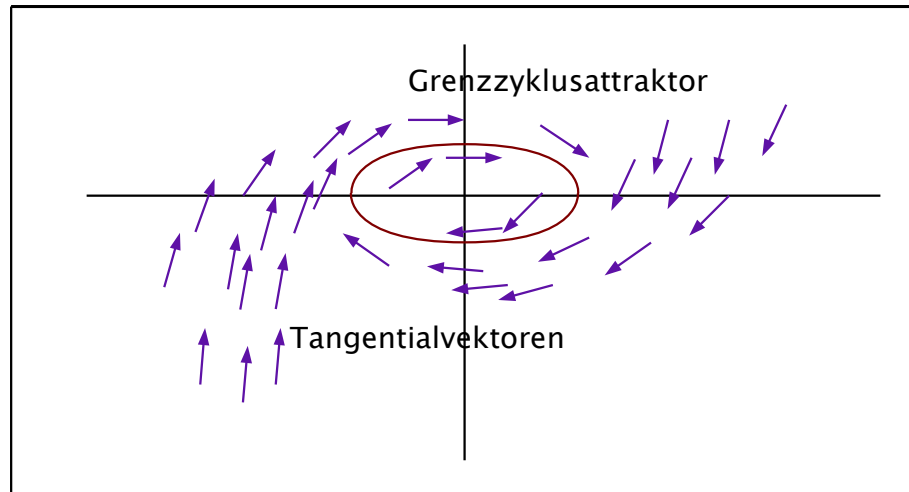
S. auch R.W. LEVEN / B.-P. KOCH / B. POMPE: Chaos in dissipativen Systemen. 2. Aufl. Akademie-Verlag. Berlin. 1994. S. 33-35.

68 S. hierzu einführend Chr. GERTHSEN: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 965 – H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. (1982) 1990. S. 123-31, v.a. S. 123-25.

69 S. z.B. L. PERKO: Differential Equations and Dynamical Systems. 3rd Ed. Springer. New York u.a. 2009. PP. 2-3 – G. TESCHL: Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011. PP. 188-89 – H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 36, 59-60 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 14-15 – W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 218 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 24-28 – J.C. ROBINSON: Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos. 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 104-108 – R.C. ROBINSON: An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. P. 22 – D. HINRICHSSEN / A.J. PRITCHARD (Eds.): Mathematical Systems Theory I. Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010. P. 211 – R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informa-

verfolgt.“⁷⁰

1.222 Eine zentrale Thematik im Rahmen der Theorie der dynamischen Systeme bilden dabei die – bereits erwähnten – konvergenten Systemprozesse hin zu relativ invarianten, stabilen Systemzuständen, den sog. „Attraktoren“ (engl.



Graphik.01: Schematisches Diagramm eines Vektorfelds eines Grenzyklusattraktors (rot) mit einem Teil der dazugehörigen Tangentialvektoren (blau) in einem 2-dimensionalen Phasenraum (angelehnt an G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg, Braunschweig, 1989, S. 26).

„attractors“)⁷¹ mit einem entsprechenden sog. „Attraktorbecken“ bzw. „Attraktorbecken“ (engl. „attractor basin“), die, geometrisch interpretiert, einem (Raum-)Gebiet im Phasenraum entsprechen, auf das von beliebigen Startpunkten in einem bestimmten Umfeld aus benachbarte Trajektorien asymptotisch

tics, 2002, P. 10.

S.auch A. NORTON: Dynamics: An Introduction. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London, 1995. PP. 49-52, v.a. P. 51.

70 S. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5, 1996, S. 154.

71 Zur mathematisch-naturwissenschaftlichen (Minimal-)Definition eines sog. „Attraktors“ (engl. „attractor“) s. Fn. 73.

Einführend s. z.B. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5, 1996, S. 154-57 – Kl. MAINZER: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis Verlag, Paderborn, 2010, S. 42-44 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater. Roland Asanger Verlag, Heidelberg, 1994, S. 45 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verl., München, 2006, S. 83-86 – T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. Chap. 4: Cognitive Systems as Dynamical Systems: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. MIT Press, 1996, PP. 47-48 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper, München u.a. 1993, S. 99-107. S. auch J.F. KOLEN: Dynamical Systems and Iterated Function Systems. In: J.F. KOLEN / St.C. KREMER (Eds.): A Field Guide to Dynamical Recurrent Networks. IEEE Press, New York, 2001, PP. 61-64.

matisch zusteuern, m.a.W. das diese Trajektorien „anzieht“ (s. Graphik.02).
Deren formale mathematisch-naturwissenschaftliche (Minimal-)Definition
kann man in Bezug auf ein diskretes, deterministisches dynamisches System⁷²
wie folgt angeben⁷³: Sei eine n -fache Iteration einer (Transformations-)Funk-
tion f^n mit $f^n(x_1) = x_{n+1}$ mit $n \in \mathbb{Z}^+$ und $x \subseteq X$ gegeben, dann bezeichnet man
eine kompakte, invariante und attraktive Menge $A \subseteq X$ als einen Attraktor,
falls es eine (Fundamental-)Umgebung U von A gibt, sodaß gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(f^n(x), A) = 0 \quad \forall x \in U, \quad U \text{ Umgebung von } A \subseteq X \quad (7)$$

mit den beiden Eigenschaften

$$(1) \bigcap_{n \geq 0} f^n(U) = A \quad (8) \text{ und}$$

$$(2) f(\bar{U}) \subseteq U \text{ mit } (\bar{U}): \text{Abschluß von } U. \quad (9)$$

Man kann nun eine Klassifikation von verschiedenen Attraktortypen⁷⁴ vorneh-

72 Mit Bezug auf ein stochastisches dynamisches System s. z.B. Fr. HEYLIGHEN: The Science of Self-Organization and Adaptivity. In: L.D. KIEL (Ed.): The Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers. Oxford. 2003. PP. 19-20, der das Konzept eines Attraktors mit Bezug auf eine Unter-
menge A des Systemzustandsraums X wie folgt definiert:
Gegeben $A \subseteq X$ mit $\forall x_i \in A, \forall x_j \notin A, \forall n$, so gilt:

$$f^t(x_i) \in A, \quad M_{ij}^n = 0 \text{ mit } M \text{ als einer Transitionsmatrix (engl. "transition matrix") einer MARKOV-Kette (engl. "Markov chain") und}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} M_{ik}^n = 0, \text{ falls } s_k \notin A.$$

S. hierzu auch A. BERGER: Chaos and Chance. An Introduction to Stochastic Aspects of Dynamics. De Gruyter. Berlin, New York. 2001. PP. 14-17, 156-61 – W. EBELING / H. ENGEL / H. HERZEL: Selbstorganisation in der Zeit. Akademie-Verlag. Berlin. 1990. S. 27-43.

73 Grundlegend s. z.B. S.E. NEWHOUSE: Understanding Chaotic Dynamics. In: J. CHANDRA (Ed.): Chaos in Nonlinear Dynamical Systems. SIAM. Philadelphia. 1984. PP. 1-11, v.a. P. 4 – R.L. DEVANEY: An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. Addison-Wesley. New York. 1994. PP. 201-14. Eingehend s. z.B. W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 8-15 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 54-55 – L. PERKO: Differential Equations and Dynamical Systems. 3rd Ed. Springer. New York u.a. 2009. PP. 194-95 – J. GUCKENHEIMER / Ph. HOLMES: Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Rev. and Corr. 3rd Printing. Springer. New York u.a. 1990. P. 256 – G. TESCHL: Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society. Providence/ Rhode Island. 2011. PP. 227-31, 280-81 – R. DER / J.M. HERRMANN: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002. P. 46 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. P. 25 – J.C. ROBINSON: Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos. 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 326-28.

S. auch W. EBELING / H. ENGEL / H. HERZEL: Selbstorganisation in der Zeit. Akademie-Verlag. Berlin. 1990. S. 9-15.

74 Einführend s. z.B. R.L. DEVANEY: An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. Addison-Wesley. New York. 1994. PP. 201-14 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 148.

S. auch H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 154-56 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: Dynamische Systeme. Grundlagen und Analy-

men, u.z. dem Typ

- (1) des sog. „Fixpunktattraktors“ (engl. “fixed-point attractor”),
- (2) des sog. „Grenzyklusattraktors“ (engl. “limit cycle attractor”)⁷⁵,
- (3) des sog. „Torusattraktors“ (engl. “torus attractor”),
- (4) des sog. „seltsamen“ oder „chaotischen Attraktors“ (engl. “strange” oder “chaotic attractor”)⁷⁶.

Mit einer exakten Analyse der sog. „strukturellen Stabilität“ (engl. “structural stability”)⁷⁷ eines dynamischen Systems gegenüber den inneren und äußeren (Ver-)Störungen, den sog. „Perturbationen“ (engl. “perturbations”), des Systemverhaltens beschäftigt sich die mathematische sog. „Stabilitätstheorie“ (engl. “stability theory”)⁷⁸ i.S. von A.M. LYAPUNOV⁷⁹, H. POINCARÉ und A.A.

semethoden für Psychologen und Psychiater. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994. S. 53-55 – B. KOSKO: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992. P. 15.

75 S. Graphik.01 und Graphik.02.

76 S. hierzu die Ausführungen in Kap. 1.232.

77 S. z.B. R.L. DEVANEY: An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. Addison-Wesley. New York. 1994. PP. 53-60 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 123-41 – S.G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 65-67, v.a. S. 66.

78 Eingehend s. z.B. L. PERKO: Differential Equations and Dynamical Systems. 3rd Ed. Springer. New York u.a. 2009. PP. 129-46 – H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 111-94 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 138-218 – G. TESCHL: Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems. American Mathematical Society. Providence/ Rhode Island. 2011. PP. 196-201 – M.D. MESAROVIC / Y. TAKAHARA: General Systems Theory: Mathematical Foundations. Academic Press. New York. 1975. PP. 110-18 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 123-41, v.a. S. 131-38. Einführend s. z.B. K. KÖNIGSBERGER: Analysis 2. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002. S. 158-64, v.a. S. 158.

S. auch W. EBELING / H. ENGEL / H. HERZEL: Selbstorganisation in der Zeit. Akademie-Verlag. Berlin. 1990. S. 15-26 – H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 151-74.

79 Einführend s. z.B. H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 111-94 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 125, 131-38 – J.C. ROBINSON: Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos. 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 156-58.

Die „Stabilität“ (engl. “stability”) eines (nicht erregten) Systems i.S. von A.M. LYAPUNOV wird nach R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 125 mathematisch wie folgt definiert:

„Ein Gleichgewichtszustand \mathbf{z}_e heißt genau dann *stabil*, wenn für willkürliche Werte t_0 und $\varepsilon > 0$ stets eine nur von t_0 und ε abhängige Größe $\delta = \delta(t_0, \varepsilon) > 0$ existiert, so daß

$$\|\zeta(t; \mathbf{z}(t_0)) - \mathbf{z}_e\| < \varepsilon \quad \text{für alle } t \geq t_0$$

gilt, falls der Anfangszustand $\mathbf{z}(t_0)$ innerhalb der δ -Umgebung des Gleichgewichtszustands gewählt wird, d.h. derart, daß

ANDRONOV.

1.223 Die sog. „Linearität“ (engl. “linearity”)⁸⁰ bzw. „Nichtlinearität“ (engl. “non-linearity”)⁸¹ eines komplexen⁸² dynamischen Systems wird bestimmt anhand der jeweils verwendeten (Transformations-)Funktion f , die entweder der allgemeinen linearen Form entspricht gemäß

$$f(x) = ax + b, \quad (10)$$

oder den allgemeinen nichtlinearen Formen, z.B. der polynomialen Funktion (engl. “polynomial function”) (11), der Exponentialfunktion (engl. “exponential function”) (12) oder der logistischen Funktion (engl. “logistic function”) (13) gemäß

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}_0 \quad (11) \quad \text{und den konstanten Koeffizienten } a_0, a_1, a_2, \dots, a_n \text{ oder}$$

$$f(x) = a^x \quad \text{bzw.} \quad f(x) = e^x \quad (12) \quad \text{mit } a > 0 \text{ und } a \neq 1, \quad \text{oder}$$

$$\| \mathbf{z}(t_0) - \mathbf{z}_e \| < \delta$$

ist.

Die Stabilität verlangt also, daß um den betrachteten Gleichgewichtszustand stets eine Umgebung von Anfangszuständen $\mathbf{z}(t_0)$ vorhanden ist, so daß die Lösungen $\zeta(t; \mathbf{z}(t_0))$ für alle $t \geq t_0$ innerhalb einer noch so kleinen Umgebung des Gleichgewichtszustands bleiben. Natürlich muß $\delta < \varepsilon$ sein.“

Siehe hierzu auch die Ausführungen zu der sog. „LYAPUNOV-Funktion“ in Kap. 2.23.2.

80 Einführend s. z.B. R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 7-9.

81 Eingehend s. z.B. J.L. CASTI: Nonlinear System Theory. Academic Press. Orlando/FLO, London. 1985. v.a. PP. 18-22 – H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 1-34 – R.C. ROBINSON: An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. PP. 67-97.

Einführend s. z.B. J. ARGYRIS / G. FAUST / M. HAASE: Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1995. S. 39-60 – Cl.

HOOKER: Introduction to Philosophy of Complex Systems: A. In: Cl. HOOKER (Ed.): Philosophy of Complex Systems. Handbook of the Philosophy of Science. Vol. 10. Elsevier. New York. 2011. PP. 21-22.

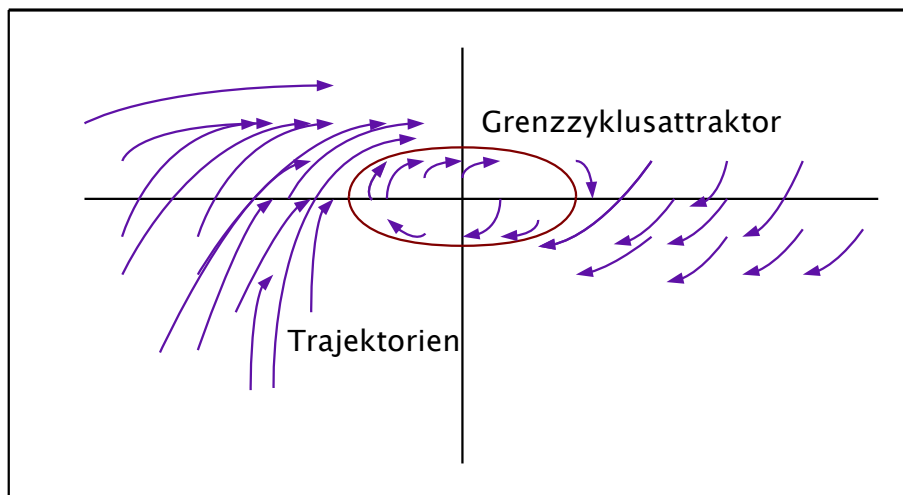
S. auch Kl. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Man-kind. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. PP. 1-13 – Kl. MAINZER: Organic Computing and Complex Dynamical Systems. Conceptual Foundations and Interdisciplinary Perspectives. In: R.P. WÜRTZ (Ed.): Organic Computing. Springer-Verlag. Berlin. 2008. PP. 105-22, v.a. PP. 105-109 – Kl. MAINZER: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis Verlag. Paderborn. 2010. S. 40-42 – Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme and Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999. S. 3-29, v.a. S. 3-6, der diese Thematik anhand einer Vielzahl von Beispielen von komplexen dynamischen Systemen mit nichtlinearer Dynamik aus der Mathematik und den Naturwissenschaften erläutert.

S. i.B. auf nichtlineare dynamische Systeme im Konnektionismus J.L. ELMAN / E.A. BATES / M.H. JOHNSON / A. KARMILOFFSMITH / D. PARISI / K. PLUNKETT: Rethinking Innateness. A Connectionist Perspective on Development. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 173-210.

82 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.224.

$$f(x) = S \cdot \frac{1}{1 + e^{-kSt} \left(\frac{S}{f(0)} - 1 \right)} \quad (13) \text{ mit } S \text{ als einem Schwellenwert und einer}$$

Konstante k .



Graphik.02: Schematisches Diagramm eines Phasenportraits eines Grenzyklusattraktors (rot) mit den dazugehörigen Trajektorien (blau) in einem 2-dimensionalen Phasenraum: Die entsprechenden Bahnen sind asymptotisch stabil (angelehnt an G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg, Braunschweig, 1989. S. 40 und D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin u.a. 1994. S. 20).

1.224 Eine weitere zentrale Thematik im Rahmen der Theorie der Dynamischen Systeme bildet die – noch nicht einheitlich vorgenommene – Begriffsbestimmung ihrer sog. „Komplexität“ (engl. “complexity”)⁸³, die am besten

⁸³ Eingehend s. z.B. E. MORIN: On Complexity. Hampton Press, Cresskill/NJ, 2008 – Kl. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind. (5. Aufl.) Springer-Verlag, Berlin u.a. 1994 (2007) – D. CHU / R. STRAND / R. FJELLAND: Theories of Complexity. Common Denominators of Complex Systems. Complexity, Vol. 8, 2003, PP. 19-30 – Gr.D. SNOOKS: A General Theory of Complex Living Systems: Exploring the Demand Side of Dynamics. Complexity, Vol. 13, 2008, PP. 12-20 – A. JUARRERO: Complex Dynamical Systems Theory. Manuscript. From: http://cognitive-edge.com/uploads/articles/100608%20Complex_Dynamical_Systems_Theory.pdf.

Einführend s. z.B. Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Exploring Complexity: An Introduction. W.H. Freeman, San Francisco, 1989 – I. PRIGOGINE: New Perspectives on Complexity. In: S. AIDA et al. (Eds.): The Science and Praxis of Complexity: Contributions to the Symposium held at Montpellier, France, 9-11 May, 1984. United Nations University, Tokyo, 1985. Reprinted in: G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press, New York, London, 1991, PP. 483-92 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1998, S. 13-39.

Einen allgemeinverständlichen Überblick bietet z.B. Cl. HOOKER: Introduction to Philosophy of Complex Systems: A. In: Cl. HOOKER (Ed.): Philosophy of Complex Systems. Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 10. Elsevier, New York, 2011, PP. 3-90 – Kl. MAINZER: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis, Paderborn, 2010, S. 35-44. Einen geschichtlichen Überblick über die Komplexitätsthematik bietet z.B. J.-Cl. HEUDIN: Artificial

am Begriff der komplexen Struktur erläutert werden kann.⁸⁴ Die Theorie der komplexen Systeme ist nun erstmals im Rahmen der sog. „Statistischen Physik“ (engl. “statistical physics”)⁸⁵ i.S. von L. BOLTZMANN, M. PLANCK, A. EINSTEIN und J. von NEUMANN behandelt worden, die aufgezeigt hat, daß bei einem System, bezogen auf seine Subsysteme, qualitativ neue (System-)Eigenschaften auftreten können, was man als sog. „Emergenz“ (engl. “emergence”)⁸⁶ bezeichnet, sodaß man mit Kl. MAINZER⁸⁷ diese Bedingung mit in die Begriffsbestimmung mit aufzunehmen hat.

Eine quantitativ-mathematische Definition im Rahmen der sog. „Komplexitätstheorie“ (engl. “complexity theory”)⁸⁸ ist z.B. in Form der sog. „algorithmischen Komplexität“ (engl. “algorithmic complexity”) nach A.N. KOLMOGO-

Life and the Sciences of Complexity: History and Future. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 227-47.

84 S. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 18 unter Hinweis auf H.A. SIMON: The Architecture of Complexity. Proceedings of the American Philosophical Society. Vol. 106. 1962. PP. 467-82 – P. GRASSBERGER: Randomness, Information, and Complexity. In: F. RAMOS-GOMES (Ed.): Proceedings of the Fifth Mexican School on Statistical Physics. World Scientific. Singapore. 1989. PP. 59-99 – P. GRASSBERGER: Problems in Quantifying Self-Generated Complexity. Helvetica Physica Acta. Vol. 62. 1989. PP. 489-511 – Y.-C. LAI / C. GREBOGI: Complexity in Hamiltonian-Driven Dissipative Chaotic Dynamical Systems. Physical Review E. Vol. 54. PP. 4667-75, v.a. P. 4667.

85 S. hierzu einführend z.B. Chr. GERTHSEN: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 923-57.

86 Eingehend s. z.B. A. STEPHAN: Emergenz. Von der Unvorhersagbarkeit zur Selbstorganisation. Dresden Universitätsverlag. Dresden. 1999 – A. STEPHAN: Zur Rolle des Emergenzbegriffs in der Philosophie des Geistes und in der Kognitionswissenschaft. In: D. STURMA (Hrsg.): Philosophie und Neurowissenschaften. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2006. S. 146-66 – Kl.-D. SEDLACEK et al.: Emergenz. Strukturen der Selbstorganisation in Natur und Technik. BoD Verlag. Norderstedt. 2010. Einführend s. z.B. B. FELTZ: Self-Organization, Selection and Emergence in the Theories of Evolution. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 341-60, v.a. PP. 353-58. Kritisch s. z.B. Kl. KORNWACHS: Nichtklassische Systeme und das Problem der Emergenz. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 208-21.

Das Konzept der Emergenz ist inzwischen auch anhand des Konstrukts der sog. „Hyperstruktur“ (engl. “Hyperstructure”) mathematisch formuliert worden. S. hierzu z.B. N.A. BAAS: Self-Organization and Higher Order Structures. In: F. SCHWEITZER (Ed.): Self-Organization of Complex Structures. From Individual to Collective Dynamics. Gordon and Breach. London. 1997. PP. 71-81, v.a. P. 74.

87 S. z.B. Kl. MAINZER: Was ist Leben. Denkanstöße. Bd. 93. 1992. S. 43.

88 Eingehend s. z.B. G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 113-34.

S. auch E.R. NAKAMURA / T. MORI: Was ist Komplexität? In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme and Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer. Berlin u.a. 1999. S. 89-100.

Einführend s. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 25-29, die eine Übersicht über weitere Komplexitätsmaße anbieten.

ROV⁸⁹, G.J. CHAITIN⁹⁰ und R. SOLOMONOV⁹¹ erfolgt.⁹²

-
- 89 S. z.B. A.N. KOLMOGOROV: Three Approaches to the Definition of the Concept "Quantity of Information". Problemy Peredachi Informatsii. Vol. 1. 1965. PP. 3-11 – A.N. KOLMOGOROV: Three Approaches to the Quantitative Definition of Information. Problems of Information and Transmission. Vol. 1. 1965. PP. 1-7 – A.N. KOLMOGOROV: Logical Basis for Information Theory and Probability Theory. IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 14. 1968. PP. 662-64.
- 90 S. z.B. G.J. CHAITIN: Randomness and Mathematical Proof. Scientific American. Vol. 232. 1975. PP. 47-52.
- 91 S. z.B. R.J. SOLOMONOFF: A Formal Theory of Inductive Inference. Part 1. Information and Control. Vol. 7. 1964. PP. 1-22 – R.J. SOLOMONOFF: A Formal Theory of Inductive Inference. Part 2. Information and Control. Vol. 7. 1964. PP. 224-54.
- 92 Nach der sog. „algorithmischen Informationstheorie“ (engl. "Algorithmic Information Theory (AIT)") i.S. A.N. KOLMOGOROV's, G.J. CHAITIN's und R. SOLOMONOV's besteht der Sinn einer Theorie darin, einen (komplexen) Sachbereich der Wirklichkeit anhand einer möglichst kompakten und effizienten Komprimierung von (algorithmischer) Information im Rahmen eines Computerprogramms zu erfassen, sodaß es, sofern eine Theorie in axiomatisierter Form gegeben ist, darauf ankommt, „aus einer kleinen Satzmenge mittels logischer Folgerungen eine möglichst umfassende Folgerungsmenge zu erhalten.“
Einführend s. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 25-27 – B. KANITSCHIEDER: Chaos und Selbstorganisation in Natur- und Geisteswissenschaft. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 72-79 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 118-24, v.a. S. 122 – H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 35-40.
Kritisch hierzu I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 118-24.

1.23 PARADIGMA DER SELBSTORGANISATION

1.230 Das mit der Theorie der dynamischen Systeme eng zusammenhängende Paradigma der Selbstorganisation (engl. "paradigm of self-organization")⁹³, das spontane Strukturbildungsprozesse beschreibt, kann – etwas vereinfacht – anhand seines Grundbegriffs der sog. „Selbstorganisation“ (engl.

⁹³ Eingehend s. z.B. St. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Chapt. 5: *Self-Organization and Adaptation in Complex Systems*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 173-88 – E. JANTSCH: *Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist*. Carl Hanser Verlag. München, Wien. 1979 (1992) – Fr. HEYLIGHEN: *The Science of Self-Organization and Adaptivity*. In: L.D. KIEL (Ed.): *The Encyclopedia of Life Support Systems*. EOLSS Publishers. Oxford. 2003. PP. 1-26.

Einführend s. z.B. G.J. DALENOORT: *The Paradigm of Self-Organization: Studies of Autonomous Systems*. In: G.J. DALENOORT (Ed.): *The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization*. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989. PP. 1-22 – G.J. DALENOORT: *Mechanisms of Self-Organization*. In: G.J. DALENOORT (Ed.): *The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization*. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989. PP. 298-308 – A.M. FREUND / M.-Th. HUETT / M. VEC: *Selbstorganisation: Aspekte eines Begriffs- und Methodentransfers*. In: M. VEC / M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 12-32 – J. GÖTSCHL: *Selbstorganisation: Neue Grundlagen zu einem einheitlichen Realitätsverständnis*. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 35-65 – Kl. MAINZER: *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. In: Kl. MAINZER: *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert*. Springer. Berlin u.a. 1999. S. 3-29 – W. NEUSER: *Zur Logik der Selbstorganisation*. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: *Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen*. Bouvier Verl. Bonn. 1998. S. 15-34, v.a. S. 26-29 – M.-Th. HUETT / C. MARR: *Selbstorganisation als Metatheorie*. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 106-26 – Chr. von der MALSBURG: *Self-Organization and the Brain*. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1002-1005 – Kl. MAINZER: *The Emergence of Self-Conscious Systems. From Symbolic AI to Embodied Robotics*. In: L. LEWIS / T. METZLER (Eds.): *Human Implications of Human-Robot Interaction*. Templeton Foundation Press. Philadelphia. 2007. P. 2.

S. auch die Sammelbände von G.J. DALENOORT (Ed.): *The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization*. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989 – W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg.): *Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*. Vieweg. Braunschweig und Wiesbaden. 1990 – W. NIEGEL / P. MOLZBERGER (Hrsg.): *Aspekte der Selbstorganisation*. Springer-Verl. Berlin u.a. 1992 – M. VEC / M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Böhlau. Köln u.a. 2006.

Einen (geschichtlichen) Überblick findet man z.B. in A. PASLACK: *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas*. Vieweg Verl. Braunschweig, Wiesbaden. 1991 – W. KROHN / G. KÜPPERS / R. PASLACK: *Selbstorganisation – Zur Genese und Entwicklung einer wissenschaftlichen Revolution*. In: S.J. SCHMIDT (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Suhrkamp Verl. Frankfurt. 1987. S. 441-65 – U. SKIRKE: *Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunftsfähigen Fortschrittsbegriffs*. Dissertation. Universität Hamburg. 1997. Kap. 2. – M. HEIDELBERGER: *Selbstorganisation im 19. Jahrhundert*. In: W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg.): *Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*. Vieweg. Braunschweig und Wiesbaden. 1990. S. 67-104.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. K.W. KRATKY: *Der Paradigmenwechsel von der Fremd- zur Selbstorganisation*. In: K.W. KRATKY / F. WALLNER (Hrsg.): *Grundprinzipien der Selbstorganisation*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1990. S. 3-17 – M. HÜLSMANN / Chr. WYCISK / R. AGARWAL / J. GRAPP: *Prologue to Autonomous Cooperation – the Idea of Self-Or-*

„self-organization“)⁹⁴ als ein Nichtgleichgewichtsprozeß definiert werden, bei dem ein dynamisches System – vor dem Hintergrund des sog. „Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik“⁹⁵ – einen Zustand höherer Ordnung einnimmt, indem ein „Export von Entropie“⁹⁶ stattfindet⁹⁷, sodaß „die Entropieproduktion auf ein Minimum beschränkt wird“⁹⁸, wobei man nach Kl. MAINZER⁹⁹ zu unterscheiden hat zwischen der sog. „konservativen Selbstorganisation“ im thermi-

gization as its Basic Concepts. In: M. HÜLSMANN / K. WINDT: Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007. PP. 23-44 – Y. AIZAWA: Selbstorganisation in Nichtlinearen Systemen. In: Daiseion-ji e.V. / Wilhelm Gottfried Leibniz Gemeinschaft e.V. (Hrsg.): 2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für integrative Wissenschaft. Verlag J.H. Röll, Bonn, 2006. S. 43-57.

- 94 S. z.B. W. NIEGEL: Selbstorganisation – Annäherung an einen Begriff. In: W. NIEGEL / P. MOLZBERGER (Hrsg.): Aspekte der Selbstorganisation. Springer-Verl. Berlin u.a. 1992. S. 1-18.
- 95 S. hierzu z.B. W.J. MOORE: Grundlagen der Physikalischen Chemie. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1990. S. 134-35, 148-49: Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, daß insgesamt die Entropie S – i.S. von „Unordnung“ – eines abgeschlossenen Systems niemals abnehmen kann, d.h. $\Delta S \geq 0$, sodaß mit dem Physiker Rudolf CLAUSIUS die Entropie des Universums immer einem Maximum zustrebt, wohingegen sie in seinen Subsystemen durchaus abnehmen kann, sodaß dies auf Grund der Tendenz zur spontanen Instabilität eines Systems zu einer Zeitentwicklung, einem „Pfeil der Zeit“ i.S. des britischen Astrophysikers Arthur St. EDDINGTON, führt, was einem Übergang zu immer wahrscheinlicheren (System-)Zuständen entspricht.
- Einführend s. z.B. I. PRIGOGINE: From Being to Becoming. Freeman, San Francisco, 1980. PP. 5-12 . S. auch W. EBELING: Physik der Selbstorganisation und Evolution. Akademie-Verlag, Berlin, 1982. S. 37-43 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1998. S. 33 – Kl. MAINZER: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis Verlag, Paderborn, 2010. S. 35-36. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.25.01 und 4.10.
- 96 S. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1998. S. 42, 43, 44.
- 97 S. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1998. S. 42-46.
- S. auch G. STRUNK: Die Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme - Grundsätzliches - Nutzen - Therapie. Systeme. Interdisziplinäre Zeitschrift für systemtheoretisch orientierte Forschung und Praxis in den Humanwissenschaften. Bd. 14, H. 2, 2000. S. 188-91 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verl. München, 2006. S. 46-53.
- 98 S. G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verl. München, 2006. S. 79.
- 99 S. Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer, Berlin u.a. 1999. S. 6-13 – Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Campus Verl. Frankfurt, New York, 1994. S. 137-44 – Kl. MAINZER: Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie. In: G. KAISER (Hrsg.): Kultur und Technik im 21. Jahrhundert. Campus Verl. Frankfurt, New York, 1993. S. 121-27 – Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag, Bonn, 2005. S. 8-9.
- S. auch E. JANTSCH: Autopoiesis: A Central Aspect of Dissipative Self-Organization. In: M. ZELENY (Ed.): Autopoiesis: A Theory of the Living Organizations. North Holland, New York 1981. PP. 66-69.

schen Gleichgewicht und der sog. „dissipativen“¹⁰⁰ Selbstorganisation“ nach I. PRIGOGINE¹⁰¹ und H. HAKEN¹⁰² i.S. der Thermodynamik fern des thermischen Gleichgewichts sowie nach L. von BERTALANFFY¹⁰³ i.S. der Selbstregulation eines dynamischen Gleichgewichts (sog. „Fließgleichgewicht“), m.a.W. man dehnt den Begriff der sog. „(thermodynamischen) Entropie“ (engl. „(thermodynamic) entropy“)¹⁰⁴ als einem allgemeinen Ordnungsmaß vom thermischen Gleichgewicht auf das Nichtgleichgewicht aus.¹⁰⁵ Ein offenes sog. „Nichtgleichgewichtssystem“ (engl. „non-equilibrium system“)¹⁰⁶, d.h. ein System fern des thermischen Gleichgewichts¹⁰⁷, zeichnet sich daher dadurch aus, daß seine Phasenübergänge und die Stabilität seiner (Ordnungs-)Strukturen durch eine kritische Balance aus nicht-linearen und dissipativen¹⁰⁸ Mechanismen bestimmt werden, d.h. sich neue, emergente¹⁰⁹ (makroskopische) (Ordnungs-)Strukturen ausbilden durch eine Vielzahl von komplexen nichtlinearen Wechselwirkungen von (mikroskopischen) Systemelementen, wenn der Austausch von Materie, Energie und Information des sog. „offenen dynamischen (dissipativen¹¹⁰) Systems“¹¹¹ mit seiner Umgebung einen kritischen Wert erreicht.¹¹²

1.231 Die Selbstorganisationstheorie ist ferner eng verbunden mit der sog. „Theorie des deterministischen Chaos“ (engl. „Deterministic Chaos Theory“)¹¹³

100 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

101 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

102 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

103 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

104 Zum Begriff der sog. „(thermodynamischen) Entropie“ (engl. „(thermodynamic) entropy“) siehe die Ausführungen in Kap. 1.25.01 und 4.10.

105 S. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 29-34.

106 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01, 1.25.03.

107 S. z.B. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 140-41 – Kl. MAINZER: Gehirn, Computer, Komplexität. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 130-32.

108 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

109 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.224, Fn. 86.

110 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

111 Nach Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer. Berlin u.a. 1999. S. 8 wird die makroskopische Dynamik eines solchen Systems definiert gemäß „einer Gleichung

$$\dot{z} = f(z, \alpha) + F(t), \quad (14)$$

wobei zukünftige Zustände nichtlinear vom Gegenwartszustand z und einem Kontrollparameter α für Stoff- und Energieaustausch abhängen. $F(t)$ steht für innere oder äußere Fluktuationen des Systems.“

112 S. Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer. Berlin u.a. 1999. S. 7.

113 Eingehend s. z.B. H.-O. PEITGEN / H. JÜRGENS / D. SAUPE: Chaos. Bausteine der Ordnung. Springer-Verlag, Berlin u.a. 1994. S. 35-129, 131-209 – A. BERGER: Chaos and Chance. An Introduction to Stochastic Aspects of Dynamics. de Gruyter, Berlin, New York. 2001 – R.W. RONALD / B.-P. KOCH / B. POMPE: Chaos in dissipativen Systemen. 2. Aufl. Akademie-Verl. Berlin. 1994 – St.H.

und der damit zusammenhängenden sog. „Bifurkationstheorie“ (engl. „Bifurcation Theory“)¹¹⁴, die geprägt sind von der Nichtvorhersehbarkeit des Systemverhaltens auf Grund der empfindlichen Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen (engl. „sensitive dependence on initial conditions“).¹¹⁵

1.232 Dieses prinzipielle Problem der Vorhersagbarkeit einer chaotischen Prozeßdynamik auf Grund der ungenauen Kenntnis der Anfangsbedingungen ei-

STROGATZ: *Nonlinear Dynamics and Chaos. With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering.* Westview Press. Cambridge 2000 – G. JETSCHKE: *Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie.* Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 112-54 – G. TESCHL: *Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems.* American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011. PP. 277-336.

Einführend s. z.B. R.C. ROBINSON: *An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete.* Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. PP. 251-53 – J. ARGYRIS / G. FAUST / M. HAASE: *Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure.* Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1995 – W. METZLER: *Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung.* B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 7-162, v.a. S. 71-78, 79-97 – J.M.T. THOMPSON / H.B. STEWART: *Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists.* Wiley. New York. 1986 – Gr. MORFILL / H. SCHEINGRABER: *Chaos ist überall ... und es funktioniert. Eine neue Weltansicht.* Ullstein. Frankfurt am Main, Berlin. 1991.

S. auch B. KANITSCHIEDER: *Chaos und Selbstorganisation in Natur- und Geisteswissenschaft.* In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft.* Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 66-90 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: *Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater.* Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994. S. 41-79 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: *Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens.* Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 46-73, 89-101 – J.F. KOLEN: *Dynamical Systems and Iterated Function Systems.* In: J.F. KOLEN / St.C. KREMER (Eds.): *A Field Guide to Dynamical Recurrent Networks.* IEEE Press. New York. 2001. PP. 64-71 – W. WILDGEN / P. PLATH: *Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung.* In: R. KÖHLER / G. ALTMANN / R.G. PIOTROWSKI: *Quantitative Linguistik. Quantitative Linguistics. Ein internationales Handbuch. An International Handbook.* Walter De Gruyter. Berlin, New York. 2005. S. 694-99 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: *Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten.* Piper. München u.a. 1993. S. 107-18.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. J. GLEICK: *Chaos: Making a New Science.* Pergamon Press. Elmsford/NY. 1987 – F.D. PEAT: *Die Entdeckung des Chaos.* München, Wien. 1990. Einen geschichtlichen Überblick bietet z.B. A. PASLACK: *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas.* Vieweg Verl. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 116-33.

- 114 Einführend s. z.B. L. PERKO: *Differential Equations and Dynamical Systems.* 3rd Ed. Springer. New York u.a. 2009. PP. 315-540 – J. GUCKENHEIMER / Ph. HOLMES: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Rev. and Corr.* 3rd Printing. Springer. New York u.a. 1990. PP. 117-65, v.a. PP. 119, 289-352 – D.K. ARROWSMITH / C.M. PLACE: *Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen.* Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 219-82, 283-351 – G. JETSCHKE: *Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie.* Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 155-70 – H.K. KHALIL: *Nonlinear Systems.* Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 69-76 – G. TESCHL: *Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems.* American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011. P. 198 – J. ARGYRIS / G. FAUST / M. HAASE: *Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure.* Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1994. S. 264-417 – J.C. ROBINSON: *Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos.* 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 237-61. S. auch G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: *Mathematical Foundations of Neuroscience.* Springer-Verlag. New York, London. 2010. PP. 56-63 – J.F. KOLEN: *Dynamical Systems and Iterated*

nes chaotischen Systems kann im theoretischen Modell anhand von verschiedenen Versionen von sog. „seltsamen“ oder „chaotischen Attraktoren“ (engl. “strange” oder “chaotic attractors”)¹¹⁶ dargestellt werden, wobei der sog. “LORENZ attractor”, der “HÉNON attractor” und der “RÖSSLER attractor” die bekanntesten sind.

1.233 Schließlich kann somit sogar die biogenetische und die soziale Evolution als eine Sequenz von zyklischen Selbstorganisationsprozessen betrachtet werden, die u.a. z.B. vom Prinzip der sog. „selbstorganisierten Kritizität“ (engl. “Self Organized Criticality (SOC)”) nach P. BAK¹¹⁷ dominiert wird.¹¹⁸

Function Systems. In: J.F. KOLEN / St.C. KREMER (Eds.): A Field Guide to Dynamical Recurrent Networks. IEEE Press. New York. 2001. PP. 68-71 – H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 156-57 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 65-67 – W. WILDGEN / P. PLATH: Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung. In: R. KÖHLER / G. ALTMANN / R.G. PIOTROWSKI: Quantitative Linguistik. Quantitative Linguistics. Ein internationales Handbuch. An International Handbook. Walter De Gruyter. Berlin, New York. 2005. S. 693-94.

Eine sog. „Bifurkation“ (engl. “bifurcation”) stellt dabei eine Verzweigung i.S. einer „Zweiweg-Gabelung“ im Systemzustandsraum während eines kritischen Systemzustandes dar, der eine qualitative Systemzustandsänderung nach sich zieht und sich somit auf die (eigen-)zeitliche Entwicklung des nichtlinearen Systems auswirkt.

115 Eingehend s. z.B. H.-O. PEITGEN / H. JÜRGENS / D. SAUPE: Chaos. Bausteine der Ordnung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 37-50.

Einführend s. z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 91-98, 107-12.

Zur mathematischen Definition dieser grundlegenden Eigenschaft eines chaotischen Systems s. z.B. J.C. ROBINSON: Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos. 2nd Ed. CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 84-88 – R.C. ROBINSON: An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. P. 251.

116 Eingehend s. z.B. H.-O. PEITGEN / H. JÜRGENS / D. SAUPE: Chaos. Bausteine der Ordnung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 211-346 – H.G. SCHUSTER / W. JUST: Deterministic Chaos: An Introduction. 4th Ed. WILEY-VCH Verlag. Weinheim. 2005. PP. 89-125.

Einführend s. z.B. R.C. ROBINSON: An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. PP. 245-90 – W. METZLER: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 79-98, v.a. S. 95 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 25-27 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 143-54 – J. ARGYRIS / G. FAUST / M. HAASE: Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1995. S. 138-43.

S. auch J.F. KOLEN: Dynamical Systems and Iterated Function Systems. In: J.F. KOLEN / St.C. KREMER (Eds.): A Field Guide to Dynamical Recurrent Networks. IEEE Press. New York. 2001. PP. 64-68 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verl. München. 2006. S. 59-61 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994. S. 44-45, 67.

117 Grundlegend s. z.B. P. BAK / C. TANG / K. WIESENFELD: Self-Organized Criticality. An Explanation of the 1/f Noise. Physical Review Letters. Vol. 59. 1987. PP. 381-84.

Einführend s. z.B. P. BAK / K. CHEN: Selbstorganisierte Kritizität. Spektrum der Wissenschaft. Hf. 3. 1991. S. 62-71 – St. KAUFFMAN: Investigations. Oxford University Press. Oxford. 2000. PP. 188-90.

118 S. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information.

1.24 DIVERSE MODELLKONZEPTIONEN (PHILOSOPHIE UND WISSENSCHAFTSTHEORIE)

1.240 In der Philosophie und der Wissenschaftstheorie haben nun eine Anzahl von Autoren¹¹⁹ dieses Paradigma (engl. "paradigm") der Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme einschließlich der Selbstorganisationstheorie – im Sinne von Th.S. KUHN¹²⁰ – aufgegriffen¹²¹, u.a. auch mit der Absicht, ein grundlegendes Forschungsprogramm anzuregen, damit man den Konnektio-

119 Zusätzlich zu den Autoren, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, wären z.B. noch zu erwähnen: die "Second-Order Cybernetics" des österreichischen Physikers und Philosophen Heinz von FOERSTER, der "Systemism" des argentinischen Physikers und Philosophen Mario BUNGE, die „Allgemeine Modelltheorie“ des Philosophen Herbert STACHOWIAK, die „informationelle Selbstorganisation“ des österreichischen Wissenschaftstheoretikers und Philosophen Erhard OESER, und die „Allgemeine Systemtheorie“ des Biologen und Philosophen Gerhard SCHLOSSER.

120 Der Begriff des sog. „Paradigmas“ (engl. "paradigm") bezeichnet nach Th.S. KUHN: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. 11. Aufl. Suhrkamp Verl. Frankfurt am Main. 1991. S. 25-26, 37-48 die Menge der Kernaussagen, die einer erfahrungswissenschaftlichen Theorie und deren geschichtlicher Entwicklung zu Grunde liegen, eine beständige Gruppe von Anhängern anziehen und zur Schulbildung veranlassen, um sich, indem sie denselben Regeln für die wissenschaftliche Forschungstätigkeit verbunden sind, den noch ungelösten Problemen über einen langen Zeitraum hin zu widmen.

121 Eingehend s. z.B. G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 49-103, v.a. S. 85 – H. LENK: Wissenschaftstheoretische und philosophische Bemerkungen zur Systemtheorie. In: H. LENK: Pragmatische Philosophie. Plädoyers und Beispiele für eine praxisnahe Philosophie und Wissenschaftstheorie. Hoffmann und Campe Verlag. Hamburg. 1975. S. 247-67, v.a. S. 247, 258 – H. LENK: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 257 – Fr. HÄNDLE / St. JENSEN: Einleitung der Herausgeber. In: Fr. HÄNDLE / St. JENSEN (Hrsg.): Systemtheorie und Systemtechnik. Nymphenburger Verlagshandlung. München. 1974. S. 7-51, v.a. S. 13, 21.

Allgemein hierzu s. z.B. G. EILENBERGER: Komplexität. Ein neues Paradigma der Naturwissenschaften. In: H. von DITFURTH / E.P. FISCHER (Hrsg.): Mannheimer Forum 1989/90. Ein Panorama der Naturwissenschaften. Piper. München. 1990. S. 71-134 – K.W. KRATKY: Der Paradigmenwechsel von der Fremd- zur Selbstorganisation. In: K.W. KRATKY / F. WALLNER (Hrsg.): Grundprinzipien der Selbstorganisation. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1990. S. 3-12.

S. auch M.-Th. HUETT / C. MARR: Selbstorganisation als Metatheorie. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 106-26 – J. GÖTSCHL: Selbstorganisation: Neue Grundlagen zu einem einheitlichen Realitätsverständnis. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 35-65, v.a. S. 48, 59-63.

Einen Überblick hierzu bietet z.B. A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 1-4, 14-24 – W. KROHN / G. KÜPPERS: Selbstorganisation: Ein neues Paradigma für die Wissenschaften. Information Philosophie. Vol. 20. 1992. S. 23-30 – W. KROHN / G. KÜPPERS / R. PASLACK: Selbstorganisation – Zur Genese und Entwicklung einer wissenschaftlichen Revolution. In: S.J. SCHMIDT (Hrsg.): Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus. Suhrkamp Verlag. Frankfurt. 1987. S. 441-65 – U. SKIRKE: Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunftsfähigen Fortschrittsbegriffs. Dissertation. Universität Hamburg. 1997. Kap. 2.1.

Kritisch hierzu z.B. K. GLOY: Systemtheorie – das neue Paradigma? In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 227-42, v.a. S. 227, 242 – K. GLOY: Wurzeln und Applikationsbereiche der Systemtheorie. Kritische Fragen. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 5-12, v.a. S. 8, 10. Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.02, Fn. 134, 135.

nismus mit der Theorie der künstlichen neuronalen Netzwerke, indem man ihn als eine Subdisziplin innerhalb der Theorie der nichtlinearen, komplexen dynamischen Systeme betrachtet¹²², i.S. einer (noch) zu entwickelnden Einheitswissenschaft (engl. "unified science")¹²³ in eine sog. „Generelle (Dynamische) Systemtheorie“ (engl. "General (Dynamic) System Theory (G(D)ST)")¹²⁴ einbetten könnte, was nun kurz skizziert wird:

1.24.01 Mit seiner schon in den zwanziger Jahren des 20. Jhdts. begonnenen „Allgemeinen Systemlehre“¹²⁵ hat der theoretische Biologe und Philosoph Ludwig von BERTALANFFY¹²⁶, der neben dem U.S.-amerikanischen Mathematiker Anatol RAPOPORT¹²⁷ und dem ungarischen Wissenschaftsphilosophen Ervin

122 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.20.

123 S. z.B. P. SMITH CHURCHLAND: *Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986 – L. PADULO / M.A. ARBIB: *System Theory: A Unified State-Space Approach to Continuous and Discrete Systems*. W.B. Saunders Co. Philadelphia/PA. 1974.

124 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.21-1.23.

125 S. z.B. L. von BERTALANFFY: *Zu einer allgemeinen Systemlehre*. *Biologia Generalis*. Vol. 1. 1949. PP. 114-29 (wiederabgedruckt in: Kn. BLEICHER: *Organisation als System*. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 31-45, v.a. S. 42-43).

126 Grundlegend s. z.B. L. von BERTALANFFY: *Zu einer allgemeinen Systemlehre*. *Biologia Generalis*. Vol. 1. 1949. PP. 114-29 (wiederabgedruckt in: Kn. BLEICHER: *Organisation als System*. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 31-45, v.a. S. 42-43).

Eingehend s. z.B. L. von BERTALANFFY: *The Theory of Open Systems in Physics and Biology*. *Science*. Vol. 111. 1950. PP. 23-29 – L. von BERTALANFFY: *An Outline of General System Theory*. *British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 1. (1950) 2010. PP. 134-65 – L. von BERTALANFFY: *Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme und ihre Anwendung in der Biologie*. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn. Braunschweig. 1953 – L. von BERTALANFFY: *General Systems Theory*. Braziller. New York. 1968 – L. von BERTALANFFY: *Perspectives on General System Theory*. *Scientific-Philosophical Studies*. George Braziller. New York. 1975.

Einführend s. z.B. L. von BERTALANFFY: *The History and Status of General Systems Theory*. In: G.J. KLIR (Ed.): *Trends in General Systems Theory*. Wiley-Interscience. New York, London. 1972. PP. 21-41 – V. HOFER: *Organismus und Ordnung. Zu Genesis und Kritik der Systemtheorie Ludwig von Bertalanffys*. Dissertation. Geisteswissenschaftliche Fakultät. Universität Wien. 1996 – M. DRACK: *Ludwig von Bertalanffy's Early System Approach*. *Systems Research and Behavioral Science*. Vol. 26. 2009. PP. 563-72 – V. HOFER: *Der Beginn der biologischen Systemtheorie im Kontext der Wiener Moderne. Diskurslinien und Wissenschaftsgemeinschaften als intellektueller Hintergrund für Ludwig von Bertalanffy*. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): *Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie*. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 137-58 – K. EDLINGER: *Evolution und Integration lebender Systeme: Aggregation oder Binnendifferenzierung*. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): *Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie*. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 51-54 – Fr.M. WUKETITS: *"Systems Everywhere"*. *Aspekte einer biologischen Systemtheorie*. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): *Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie*. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 44-46.

Eine Einführung in L. von BERTALANFFY: *General Systems Theory*. Braziller. New York. 1968 bietet G. de ZEEUW: *Auf der Suche nach Wissen*. In: D. BAECKER (Hrsg.): *Schlüsselwerke der Systemtheorie*. Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden. 2005. S. 145-71.

S. auch G. KNEER / A. NASSEHI: *Niklas Luhmanns Theorie sozialer Systeme*. Wilhelm Fink Verlag. München. 1993. S. 19-22.

127 S. z.B. A. RAPOPORT: *General System Theory. Essential Concepts & Applications*. Abacus Press. Tunbridge Wells. 1986 (dt.: *Allgemeine Systemtheorie. Wesentliche Begriffe und Anwendungen*. Verlag Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988).

LÁSZLÓ¹²⁸ einer der Protagonisten einer allgemeinen Systemphilosophie war, in den vierziger und fünfziger Jahren des 20. Jhdts den Versuch unternommen, diese zu einem interdisziplinären Forschungsprogramm weiterzuentwickeln in Gestalt einer sog. „Allgemeinen Systemtheorie“ (engl. “General Systems Theory (GST)”) ¹²⁹, die – mit mathematisch-exakten Methoden – allgemeine Gesetzmäßigkeiten, z.B. in Form von (logischen) Homologien und allgemeinen Systemprinzipien, zur Beschreibung von formal gleichartigen Erscheinungen in den verschiedenen Wissenschaftsbereichen bereitzustellen in der Lage sei, so daß sie damit einer *Mathesis Universalis* i.S. G.W. LEIBNIZ' nahekäme.¹³⁰ Dieses organismische Systemdenken zeichnet sich nun vor allem dadurch aus, daß im Rahmen der Analyse eines Organismus als eines lebenden Systems der Prozeß der materiell-energetischen Systemdynamik in Rückkopplungsschleifen (engl. “feedback”) im Fokus steht, wodurch er als ein offenes System, das sich mit seiner Umwelt im sog. „Fließgleichgewicht“ (engl. “steady state”, “flux equilibrium”¹³¹) befindet, zu betrachten sei, d.h. selbst angesichts eines ständigen Wechsels der Umweltbedingungen kann ein Lebewesen auf Grund eines geregelten (Wechselwirkungs-)Austauschs mit der Umgebung in Form von metabolischen Reaktionsmechanismen seine Systemstrukturen, seine organisierte (System-)Komplexität (engl. “organized complexity”)¹³² und somit seine selbst-regulierten Systemeigenschaften grundsätzlich beibehalten.¹³³

128 S. z.B. E. LÁSZLÓ: *Introduction to Systems Philosophy. Toward a New Paradigm of Contemporary Thought*. Gordon & Breach. New York u.a. 1972 – E. LÁSZLÓ: *The Systems View of the World. The Natural Philosophy of the New Developments in the Sciences*. Oxford. Blackwell. 1972 – E. LÁSZLÓ: *The Systems View of the World: A Holistic Vision for Our Time*. Hampton Press. New York. 1996 (dt.: *Systemtheorie als Weltanschauung. Eine ganzheitliche Vision für unsere Zeit*. Diederichs. München. 1998).

129 Grundlegend s. L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT (Eds.): *General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences*. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956-2002. Einführend s. z.B. L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT: *General System Theory*. In: L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT (Eds.): *General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences*. Vol. 1. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956. PP. 1-10 – W. HOFKIRCHNER / M. SCHAFRANEK: *General Systems Theory*. In: Cl. HOOKER (Ed.): *Philosophy of Complex Systems. Handbook of the Philosophy of Science*. Vol. 10. Elsevier. New York. 2011. PP. 177-94. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.21.

130 S. L. von BERTALANFFY: *Zu einer allgemeinen Systemlehre*. In: Kn. BLEICHER: *Organisation als System*. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 42-43. Zum Einfluß von G.W. LEIBNIZ auf den Systemansatz L. von BERTALANFFY's s. V. HOFER: *Organismus und Ordnung. Zu Genesis und Kritik der Systemtheorie Ludwig von Bertalanffys*. Dissertation. Geisteswissenschaftliche Fakultät. Universität Wien. 1996. S. 89-100, v.a. S. 89.

131 S. M. DRACK: *Ludwig von Bertalanffy's Early System Approach*. *Systems Research and Behavioral Science*. Vol. 26. 2009. P. 566.

132 Vgl. z.B. L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT: *General System Theory*. In: L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT (Eds.): *General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences*. Vol. 1. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956. P. 2.

133 S. L. von BERTALANFFY: *General Systems Theory*. Braziller. New York. 1968. PP. 124-31, 156-60, v.a. P. 158 – L. von BERTALANFFY: *The Theory of Open Systems in Physics and Biology*. *Science*. Vol. 111. 1950. PP. 23-25 – L. von BERTALANFFY: *Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme und ihre Anwendung in der Biologie*. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn. Braunschweig. 1953. S. 37-39 – L. von BERTALANFFY: *Zu einer allgemeinen Systemlehre*. In: Kn. BLEICHER: *Organisation als System*. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 37-39, v.a. S. 38.

1.24.02 Seit der Mitte der siebziger Jahre des 20. Jhdts. vertreten der Philosoph Hans LENK¹³⁴ und der Ingenieur und (Technik-)Philosoph Günter ROPOHL¹³⁵, die sich dabei auf L. von BERTALANFFY¹³⁶ und auf E. LÁSZLÓ¹³⁷ berufen, die Position, daß in der Philosophie und Wissenschaftstheorie die (allgemeine) Systemtheorie¹³⁸ mit ihrer Systemanalyse eine die philosophische Analyse überformende neue – oder erneuerte – sog. „Synthetische Philosophie“ (engl. „synthetical philosophy“)¹³⁹ mit metatheoretischem Charakter begründet. Mit ihrem supra-, inter- und multidisziplinären Integrationspotential „leistet sie (...) die Vereinheitlichung bislang unverbundener einzelwissenschaftlicher Theorien“, (...) „überwindet mithilfe einer vereinheitlichten Terminologie die Kommunikationsbarrieren zwischen den Disziplinen“, und (...) „gestattet es, heterogene Theorien über verschiedenartige Wirklichkeitsbereiche zu kohärenten Modellen problemorientiert zusammenzufassen“, sodaß damit auch eine Synthese zwischen dem atomistischen und dem holistischen Prinzip vorgenommen werden kann.¹⁴⁰

1.24.03 Seit der Mitte der neunziger Jahre des 20. Jhdts. haben vor allem der australische Philosoph und Kognitionswissenschaftler Tim(-othy) van GELDER¹⁴¹,

134 Zur Person Hans LENK's siehe die Website http://www.geistsoz.kit.edu/mitarbeiter_365.php.

135 Zur Person Günter ROPOHL's siehe die Website <http://www.ropohl.de/>.

136 S. L. von BERTALANFFY: The History and Status of General Systems Theory. In: G.J. KLIR (Ed.): Trends in General Systems Theory. Wiley-Interscience. New York, London. 1972. S. 36-38 – L. von BERTALANFFY: Foreword. In: E. LÁSZLÓ: Introduction to Systems Philosophy. Toward a New Paradigm of Contemporary Thought. Gordon & Breach. New York u.a. 1972. PP. XIX-XX. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

137 S. E. LÁSZLÓ: Introduction to Systems Philosophy. Toward a New Paradigm of Contemporary Thought. Gordon & Breach. New York u.a. 1972. PP. 296-99. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.24.01, Fn. 128.

138 Zur mathematischen Definition des Systembegriffs s. z.B. G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 14-32, 41-43 – G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 54-67 – H. LENK: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 241-43.

139 S. z.B. H. LENK: Wissenschaftstheoretische und philosophische Bemerkungen zur Systemtheorie. In: H. LENK: Pragmatische Philosophie. Plädoyers und Beispiele für eine praxisnahe Philosophie und Wissenschaftstheorie. Hoffmann und Campe Verl. Hamburg. 1975. S. 247-67, v.a. S. 247, 256-59 – H. LENK: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 239-69, v.a. S. 255, 257 – G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 9-49, v.a. S. 45-46 – G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 49-103, v.a. S. 85-86 – G. ROPOHL: Allgemeine Systemtheorie als transdisziplinäre Integrationsmethode. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis. Nr. 2. Jg. 14. 2005. S. 24-31, v.a. S. 28-31 unter Hinweis auf B. KANITSCHIEDER: Zum Verhältnis von analytischer und synthetischer Philosophie. Perspektiven der Philosophie. Neues Jahrbuch. Bd. 11. 1985/1986. Teil 1. S. 91-111.

140 S. G. ROPOHL: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verl. Königstein/Ts. 1978. S. 45.

S. auch G. ROPOHL: Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. Carl Hanser Verl. München, Wien. 1979. S. 92-96.

141 Zur Person Tim(-othy) van GELDER's siehe die Website <http://timvangelder.com/>.

der sich dabei ebenfalls auf L. von BERTALANFFY¹⁴² beruft¹⁴³, zusammen mit dem U.S.-amerikanischen Linguisten Robert F. PORT¹⁴⁴ dieses Paradigma der Dynamischen Systeme in Form ihrer sog. „Dynamischen (System) Hypothese“ (engl. “Dynamical (System) Hypothesis (D(S)H)”) ¹⁴⁵ aufgegriffen, wonach ein natürlicher kognitiver Agent (engl. “natural cognitive agent”), wie z.B. ein Mensch, mit seinem kognitiven System als ein dynamisches System betrachtet wird, und am besten aus der Perspektive einer (mathematischen) systemischen Dynamik (engl. “dynamics”) ¹⁴⁶ verstanden wird¹⁴⁷, sodaß der dynami-

142 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

143 S. T. van GELDER: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. P. 628 Fn. 4.

144 Zur Person Robert F. PORT's siehe die Website <http://www.cs.indiana.edu/~port/>.

145 Grundlegend s. z.B. T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 1-43, v.a. PP. 5-17 – T. van GELDER: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. PP. 615-28, v.a. PP. 616-22 – T. van GELDER: Author's Response: Disentangling Dynamics, Computation and Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. PP. 654-61 – T. van GELDER: Revisiting the Dynamical Hypothesis. Preprint No. 2/99. University of Melbourne. Department of Philosophy. 1999. PP. 1-21, v.a. PP. 9-13 – T. van GELDER: Defending the Dynamical Hypothesis. In: W. TSCHACHER / J.-P. DAUWALDER (Eds.): Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents: Nonlinear Systems Approaches to Cognitive Psychology and Cognitive Science. World Scientific. Singapore. 1999. PP. 13-28.

Einführend s. z.B. T. van GELDER: Dynamic Approaches to Cognition. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 243-45 – R.F. PORT: Dynamical Systems Hypothesis in Cognitive Science. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. PP. 1027-32 – T. van GELDER: Dynamics and Cognition. In: J. HAUGELAND (Ed.): Mind Design II. Philosophy – Psychology – Artificial Intelligence. Revised and Enlarged Edition. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1997. PP. 421-50.

Zur Kritik daran s. z.B. Chr. ELIASMITH: The Third Contender: A Critical Examination of the Dynamical Theory of Cognition. Philosophical Psychology. Vol. 9. No. 4. 1996. PP. 441-63 – Chr. ELIASMITH: Dynamical Models and van Gelder's Dynamicism: Two Different Things. Commentary in: T. van GELDER: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. PP. 615-28.

146 S. z.B. T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. P. 3: “The cognitive system is not a computer, it is a dynamical system. It is not the brain, inner and encapsulated; rather, it is the whole system comprised of nervous system, body, and environment.”

S. auch R.F. PORT: The Dynamical Systems Hypothesis in Cognitive Science. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. PP. 1027-28.

147 S. z.B. T. van GELDER: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. P. 619: “What does it mean to say that cognitive agents are dynamical systems? First, note that the hypothesis has two major components. The *nature* hypothesis is a claim about the nature of cognitive agents themselves; it specifies what they *are* (i.e., dynamical systems). The *knowledge* hypothesis is a claim about cognitive science: namely, that we can and should *understand* cognition dynamically. Obviously, these are closely related; the best evidence for the former would be the truth of the latter.”

(...)

“The nature hypothesis tells us what cognitive agents are by specifying the relation they bear to dynamical systems. It is common to interpret the hypothesis as asserting that cognitive agents

sche Ansatz grundsätzlich bestens vereinbar sei mit dem des Konnektionismus.¹⁴⁸ Entscheidend ist jedoch, daß bei der Modellierung von kognitiven Prozessen der Aspekt der (Eigen-)Zeitlichkeit des Geschehens mitberücksichtigt wird.¹⁴⁹

1.24.04 Seit den neunziger Jahren des 20. Jhdts vertritt der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Klaus MAINZER¹⁵⁰ die Position, daß mit der (mathematischen) Theorie der komplexen Systeme mit nichtlinearer (Selbstorganisations-)Dynamik¹⁵¹ eine interdisziplinäre wissenschaftstheoretische Methodologie zur Verfügung steht, um im Rahmen eines fachübergreifenden Forschungsprogramms¹⁵² nichtlineare komplexe und emergente (Prozeß-)Phänomene in

are literally identical with some particular low-level system made up of a large number of internal, low-level quantities such as neural firing rates.”

(...)

“The knowledge hypothesis is the bold claim that cognitive science *can and should* take dynamical form.”

148 S. z.B. T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): *Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition*. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 3, 32-34 – T. van GELDER: *The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. P. 621 (4.2.3.3., 4.2.3.4).

Dies z.T. einschränkend s. z.B. R.F. PORT: *The Dynamical Systems Hypothesis in Cognitive Science*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1029.

149 S. z.B. T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): *Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition*. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 18-22, P. 2: “The heart of the problem is *time*. *Cognitive processes and their context unfold continuously and simultaneously in real time*.”

150 Zur Person Klaus Mainzer's siehe die Website <http://www.professoren.tum.de/mainzer-klaus/>.

151 Grundlegend s. z.B. Kl. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. (5. Aufl.) Springer. Berlin u.a. 1994 (2007).

Eingehend s. z.B. Kl. MAINZER: *Philosophical Foundations of Nonlinear Complex Systems*. In: H. HAKEN / A. MIKHAILOV (Eds.): *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. PP. 32-43 – Kl. MAINZER: *Quanten, Chaos und Selbstorganisation. Philosophische Aspekte des physikalischen Weltbildes*. In: Kl. MAINZER / W. SCHIRMACHER (Hrsg.): *Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik*. BI-Wissenschaftsverlag Mannheim u.a. 1994. S. 21-72 – Kl. MAINZER: *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. In: Kl. MAINZER: *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert*. Springer. Berlin u.a. 1999. S. 3-29 – Kl. MAINZER: *Self-Organization and Emergence in Complex Dynamical Systems. Interdisciplinary Perspectives for Organic Computing*. In: P. DADAM / M. REICHERTS (Hrsg.): *Informatik 2004 – Informatik verbindet. Bd. 2. Proceedings. GI-Edition Lecture Notes in Informatics*. Gesellschaft für Informatik. Bonn. 2004. S. 590-94.

Einführend s. z.B. Kl. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis Verlag. Paderborn. 2010. S. 35-44, 45-88 – Kl. MAINZER: *Komplexität*. Kap. 6. UTB. Paderborn. 2008 – Kl. MAINZER: *Gehirn, Computer, Komplexität*. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 123-41.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.224, Fn. 152, Kap. 1.23, Fn. 99 und Kap. 6.14.07.

152 S. z.B. Kl. MAINZER: *Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie*. In: G. KAISER (Hrsg.): *Kultur und Technik im 21. Jahrhundert*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1993. S. 122-23 – Kl. MAINZER: *Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie*. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 144.

den Natur-, Human-, Sozial- und Kulturwissenschaften angemessen zu modellieren, sodaß man – vor allem anhand von Computersimulationen – diese komplexen (Mikro-)Prozesse von offenen (Nichtgleichgewichts-)Systemen¹⁵³ mit rückgekoppelten, zirkularkausalen Dynamiken anhand einer geringen Anzahl von makroskopischen sog. „Ordnungsparametern“ (engl. “order parameters”)¹⁵⁴ erklären und voraussagen kann.¹⁵⁵

153 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.
S. auch Kap. 1.230 Fn. 106.

154 Eingehend s. z.B. Kl. MAINZER: The Emergence of Self-Conscious Systems. From Symbolic AI to Embodied Robotics. In: L. LEWIS / T. METZLER (Eds.): Human Implications of Human-Robot Interaction. Templeton Foundation Press. Philadelphia. 2007. P. 2.
Einführend s. z.B. Kl. MAINZER: Gehirn, Computer, Komplexität. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 131 – Kl. MAINZER: Geist und Gehirn als komplexe Einheit. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2006. S. 11-33, v.a. S. 18-19.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

155 S. z.B. Kl. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind. Springer. Berlin u.a. 1994. PP. 11-13 – Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2005. S. 32-33.

Mit Bezug auf die Selbstorganisation des Gehirns s. Kl. MAINZER: Geist und Gehirn als komplexe Einheit. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2006. S. 22-29 – Kl. MAINZER: Cellular Neural Networks (CNN) and the Evolution of Complex Information Systems in Nature and Technology. In: R. TETZLAFF (Ed.): Cellular Neural Networks and their Applications. Proceedings of 7th IEEE International Workshop. World Scientific. New Jersey. 2002. PP. 483-497, v.a. PP. 491-92 – Kl. MAINZER: Organic Computing and Complex Dynamical Systems. Conceptual Foundations and Interdisciplinary Perspectives. In: R.P. WÜRTZ (Ed.): Organic Computing. Springer-Verlag. Berlin. 2008. PP. 114-19.

1.25 DIVERSE MODELLKONZEPTIONEN (NATUR-, HUMAN-, SOZIAL- UND KULTURWISSENSCHAFTEN)

1.250 In den Natur-, Human-, Sozial- und Kulturwissenschaften haben nun eine Vielzahl von Autoren¹⁵⁶ dieses Paradigma (engl. "paradigm") der Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme einschließlich der Selbstorganisationstheorie im weitesten Sinn begründet und vertreten¹⁵⁷, von denen nun im Folgenden die bedeutendsten Theorien und Positionen kurz skizziert werden:

1.25.01 Seit den vierziger Jahren des 20. Jhdts hat der russisch-belgische Physikochemiker Ilya PRIGOGINE¹⁵⁸, seit den sechziger Jahren des 20. Jhdts zusammen mit dem belgischen Ingenieur Paul GLANSDORFF und dem griechisch-belgischen Physikochemiker Grégoire NICOLIS, die sog. „Theorie der dissipativen Strukturen“ (engl. "theory of dissipative structures")¹⁵⁹ entwickelt,

¹⁵⁶ Zusätzlich zu den Autoren, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, wären z.B. noch zu erwähnen: der "Wolfram Code" des britischen Physikers und Mathematikers Steven WOLFRAM, die "Schema Theory" des englisch-U.S.-amerikanischen Mathematikers Michael A. ARBIB, die "Interactions of Actors Theory" des englischen Psychologen und Kybernetikers Gordon PASK, die "Systems Psychology" des englisch-U.S.-amerikanischen Biologen und Anthropologen Gregory BATESON und die „PSI-Theorie“ des Psychologen Dietrich DÖRNER.

¹⁵⁷ Einen Überblick hierzu bieten z.B. A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 25-79, 79-84, 85-90, 91-173, 173-77 – H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 152-57 – E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag, München, Wien. 1979 (1992). S. 49-116, 117-252 – U. SKIRKE: Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunftsfähigen Fortschrittsbegriffs. Dissertation. Universität Hamburg. 1997. Kap. 2. – Kl. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind. 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin u.a. 1994 (2007). PP. 92-112 – Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Suhrkamp Verlag, Berlin u.a. 1999. S. 3-25 – Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag, Bonn. 2005. S. 2-17 – Fr. HEYLIGHEN: The Science of Self-Organization and Adaptivity. In: L.D. KIEL (Ed.): The Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers. Oxford. 2004. PP. 2-5.

S. auch W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg): Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution. Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden. 1990 – G. SCHIEPEK / W. TSCHACHER (Hrsg.): Selbstorganisation in Psychologie und Psychiatrie. Vieweg Verlag, Braunschweig. 1997.

¹⁵⁸ Zur Person Ilya PRIGOGINE's siehe die Website http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine.html.

¹⁵⁹ Grundlegend s. P. GLANSDORFF / I. PRIGOGINE: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. Wiley-Interscience. London. 1971 – I. PRIGOGINE: Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. 3rd Ed. Wiley-Interscience. New York. (1955) 1967 – I. PRIGOGINE: Etude Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles. Dunod. Paris. 1947 – I. PRIGOGINE / J.M. WIAME: Biologie et Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles. Experientia. Tom. 2. 1946. P. 450.

Eingehend s. z.B. I. PRIGOGINE: Non-Equilibrium Statistical Mechanics. Interscience Publishers. 1962 – I. PRIGOGINE / R. LEFEVER: Theory of Dissipative Structures. In: H. HAKEN (Ed.): Synergetics. Cooperative Phenomena in Multikomponent Systems. Proceedings of the Symposium on Synergetics from April 30 to May 6, 1972, Schloß Elmau. Teubner. Stuttgart. 1973. PP. 124-35 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures

wonach die Nichtgleichgewichtsstabilität eines offenen dynamischen Systems beschrieben wird: Während man in der klassischen Thermodynamik ein von der Umgebung isoliertes System betrachtet, dessen sog. „(thermodynamische) Entropie“ (engl. „(thermodynamic) entropy“)¹⁶⁰ – gemäß dem sog. „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“¹⁶¹ – nur zunehmen kann, bis es auf Grund von irreversiblen, d.h. zeitlich nicht umkehrbaren, Prozessen in seinen thermodynamischen Gleichgewichtszustand überführt worden ist, entwarf I. PRIGOGINE¹⁶² eine nichtlineare Nichtgleichgewichts-Thermodynamik (engl. „nonlinear nonequilibrium thermodynamics“), wonach ein offenes dynamisches System ständig freie Energie mit niedriger Entropie aus der Umgebung derart importiert, daß sich die innere Erzeugung von Entropie und der Export von Entropie an die Umgebung einander die Waage halten, wodurch das

to Order through Fluctuations. Wiley. New York u.a. 1977. PP. 55-60 – I. PRIGOGINE: From Being to Becoming. Freeman. San Francisco. 1980 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Exploring Complexity: An Introduction. W.H. Freeman. San Francisco. 1989 – D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. PP. 427-57.

Einführend s. z.B. I. PRIGOGINE: New Perspectives on Complexity. In: G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 483-92 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990 – W. EBELING: Physik der Selbstorganisation und Evolution. Akademie-Verlag. Berlin. 1982. S. 37-64 – W. EBELING: Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig. 1976. S. 22-28, 110-16, 130-35 – L. von BERTALANFFY: Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme und ihre Anwendung in der Biologie. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn. Braunschweig. 1953. S. 39-48.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 61-74 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006. S. 69-70, 74-79 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 36-37, 58-59, 91-100 – Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2005. S. 2-9, v.a. S. 4-6 – U. SKIRKE: Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunfts-fähigen Fortschrittsbegriffs. Dissertation. Universität Hamburg. 1997. Kap. 2.2, 2.4 – H.J. SCHLICHTING: Von der Dissipation zur dissipativen Struktur. Praxis der Naturwissenschaften/Physik. Bd. 49. 2000. S. 12-16.

S. auch G. ALTNER (Hrsg.): Die Welt als offenes System. Eine Kontroverse um das Werk von Ilya Prigogine. Fischer. Frankfurt am Main. 1986.

¹⁶⁰ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.10.

¹⁶¹ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.10.

¹⁶² S. eingehend z.B. D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. PP. 450-52 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. Wiley. New York u.a. 1977. PP. 19-25.

S. einführend z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990. S. 146-61 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 83-91 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 37.

System seine interne Systemstruktur unter den Bedingungen „fernab vom Gleichgewicht“ (engl. “far from equilibrium”)¹⁶³ aufrechtzuerhalten vermag, d.h., „das System erneuert sich ständig selbst“¹⁶⁴. Damit konnte man erstmals spontane Selbstorganisationsprozesse in oszillierenden (chemischen) (Reaktions-)Systemen, wie z.B. der sog. „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“¹⁶⁵, erklären, indem, solange ein beständiger Durchfluß an Energie durch das System

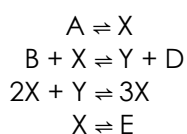
¹⁶³ S. eingehend z.B. D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. P. 409 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. Wiley. New York u.a. 1977. P. 25.

S. einführend z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990. S. 148-54 – Fr. HEYLIGHEN: The Science of Self-Organization and Adaptivity. In: L.D. KIEL (Ed.): The Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers. Oxford. 2004. PP. 14-15.

¹⁶⁴ S. E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 59.

¹⁶⁵ Die im Jahre 1958 entdeckte sog. „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“, benannt nach den sowjetischen Chemikern und (Bio-)Physikern Boris P. BELOUSOV und Anatol M. ZHABOTINSKY, bei der Malonsäure durch Kaliumbromat in einer Schwefelsäurelösung oxidiert wird, wahlweise in Gegenwart eines Redoxindikators wie z.B. Cerium-, Eisen-, oder Mangan-Ionen, stellt das Paradebeispiel für ein reaktionskinetisches System fern vom chemischen Gleichgewicht dar, ein homogener chemischer Oszillator mit einem kohärenten, rhythmischen Reaktionsverhalten, bei dem die Zwischenprodukte auf Grund von periodischen Konzentrationsdifferenzen stabile temporale Oszillationen aufweisen, die sich in Form von sich farblich verändernden, sich raum-zeitlich ausbreitenden (Wellen-)Mustern zeigen, sodaß man auch von sog. „chemischen Uhren“ (engl. “chemical clocks”) spricht.

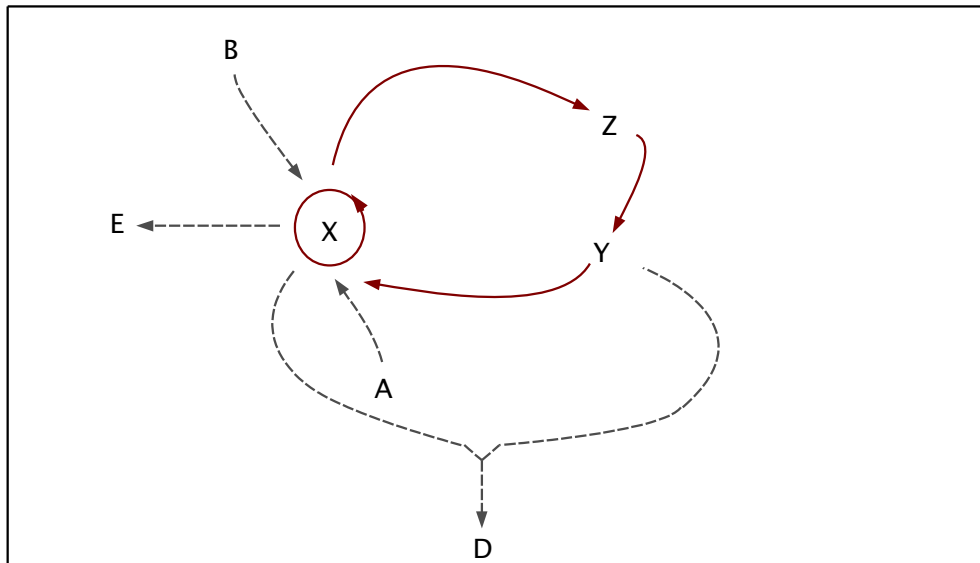
Das theoretisch-mathematische Modell der spontanen, selbstorganisierten Erzeugung von solchen sog. „dissipativen Strukturen“ (engl. “dissipative structures”) i.S. von sich raum-zeitlich ausbreitenden (Wellen-)Mustern im Rahmen eines auto- oder crosskatalytischen chemischen Reaktionssystems, z.B. der sog. „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“, ist – zum großen Teil – von der Brüsseler Schule um I. PRIGOGINE entwickelt worden (Graphik.03), weshalb es seither in der Literatur als „Brüsselator“ bzw. auch als „PRIGOGINE-LEFEVER-Modell“ bezeichnet wird, und läßt sich anhand des folgenden – vereinfachten – reaktionskinetischen Schemas darstellen:



wobei A, B, D und E die betreffenden Ausgangs- und Endreaktionsprodukte, X und Y die Zwischenreaktionsprodukte bezeichnen, deren raum-zeitliche Konzentrationsverteilungen untersucht werden soll, und vor allem die nichtlineare, autokatalytische dritte Reaktionsstufe des Systems für dessen besonderes Reaktionsverhalten in Form von periodischen Oszillationen verantwortlich ist.

S. hierzu eingehend z.B. D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. PP. 438-44, v.a. PP. 439, 442 – P. GLANSDORFF / I. PRIGOGINE: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. Wiley-Interscience. London. 1971. PP. 244-46, 261-63 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. Wiley. New York u.a. 1977. PP. 93-94, v.a. PP. 93, 195-97, 339-45, 467-68.

S. hierzu einführend z.B. I. PRIGOGINE: From Being to Becoming. Freeman. San Francisco. 1980. PP. 94-101, v.a. PP. 98-99, 109-23 – D. KONDEPUDI: Introduction to Modern Thermodynamics. Wiley. Chichester. 2008. PP. 346-51, v.a. PP. 348, 350 mit den detaillierten Reaktionsgleichungen –



Graphik.03: Darstellung eines Fließschemas der zyklischen Prozeßorganisation der sog. „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“ mit einer autokatalytischen Reaktionsstufe, wobei sich das Zwischenreaktionsprodukt X in einem „inneren“ Prozeßkreis ständig selbst erneuert (dargestellt durch den kreisförmig geschlossenen roten Kreis), und dadurch als ein Katalysator einen „äußeren“ geschlossenen Prozeßkreis im Uhrzeigersinn in Gang hält, sodaß die Zwischenreaktionsprodukte X, Y und Z beständig gebildet werden können (dargestellt durch den ellipsenförmig ge-

H. HAKEN: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. PP. 282-88 – W. EBELING: Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig. 1976. S. 22-29, 130-35, v.a. S. 135.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990. S. 139-45 – E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 61-74, v.a. S. 65, 68-70 – H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991. S. 75-80 – Fr. CRAMER: Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen. 3. Aufl. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH. Stuttgart. (1988) 1989. S. 35-37, 147-52 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 94-95.

S. auch G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006. S. 75.

Man kann also in solchen nichtlinearen, oszillierenden chemischen Reaktionssystemen unter bestimmten Bedingungen sich ausbreitende selbsterregte und sich selbst verstärkende (Wander-)Wellen(-fronten) (engl. "traveling waves", "autowaves") beobachten, die z.B. auch im Rahmen der theoretischen Analyse der Nervenleitung eine große Bedeutung spielen.

S. hierzu grundlegend z.B. A. HODGKIN: The Conduction of the Nervous Impulse. Liverpool University Press. Liverpool. 1964.

Allgemein zum Begriff der sog. „Wanderwelle“ (engl. "traveling waves") bzw. des sog. „Solitons“ (engl. "soliton") s. z.B. R. MEINEL / G. NEUGEBAUER / H. STEUDEL: Solitonen – Nichtlineare Strukturen. Akademie Verlag. Berlin. 1991. S. 9-32 – Ph.G. DRAZIN et al.: Solitons – An Introduction. Cambridge University Press. Cambridge. 2002 – Th. DAUXOIS / M. PEYRARD: Physics of Solitons. Cambridge University Press. Cambridge. 2006 – N. AKHMEDIEV / A. ANKIEWICZ (Eds.): Dissipative Solitons. From Optics to Biology and Medicine. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2008 – St. NETTEL (Ed.): Wave Physics. Oscillations, Solitons, Chaos. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2009.

schlossenen roten Kreis), sofern ein Ungleichgewicht herrscht, indem die Ausgangsreaktionsprodukte A und B beständig nachgeführt werden, und die Endreaktionsprodukte D und E aus dem Reaktionsraum entfernt werden, sobald sie erzeugt werden (angelehnt an D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. P. 439 und E. JANTSCH: *Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist*. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 65).

stattfindet, die Abnahme an Entropie durch Selbstorganisation mehr als kompensiert wird infolge der Abgabe von Energie mit hoher Entropie an die Umgebung, weshalb die derart ausgebildeten raum-zeitlichen internen Strukturen in diesen Systemen als sog. „dissipative Strukturen“ (engl. “dissipative structures”)¹⁶⁶ bezeichnet werden.

1.25.02 Seit dem Ende der sechziger Jahre des 20. Jhdts hat der theoretische Physiker Hermann HAKEN¹⁶⁷, basierend auf seinen bahnbrechenden Forschungen im Bereich der Laserphysik¹⁶⁸, die sog. „Synergetik“ (engl. “synerge-

¹⁶⁶ S. eingehend z.B. D. KONDEPUDI / I. PRIGOGINE: *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. P. 427 – Gr. NICOLIS / I. PRIGOGINE: *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. Wiley. New York u.a. 1977. P. 60 – I. PRIGOGINE: *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. 3rd Ed. Wiley-Interscience. New York. (1955) 1967. PP. 124-27.

S. hierzu einführend z.B. W. EBELING: *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen*. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig. 1976. S. 22-28 – W. EBELING: *Physik der Selbstorganisation und Evolution*. Akademie-Verlag. Berlin. 1982. S. 43-53, 53-64 – G. JETSCHKE: *Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie*. Verlag Harri Deutsch. 1989. S. 19-23 – H.J. SCHLICHTING: *Von der Dissipation zur dissipativen Struktur. Praxis der Naturwissenschaften/Physik*. Bd. 49. 2000. S. 12-16.

¹⁶⁷ Zur Person Hermann HAKEN's siehe die Website itp1.uni-stuttgart.de/arbeitsgruppen/?W=5.

¹⁶⁸ Der Laser (= Light amplification (by) stimulated emission of radiation) stellt ein dynamisches (Vielteilchen-)System fern vom thermischen Gleichgewicht dar, bestehend aus den Laseratomen und einem Lichtfeld, an dem man selbstorganisiert-kooperative Effekte mit am besten studieren kann: Sofern die Laseratome nur schwach angeregt werden, emittieren sie unabhängig voneinander (Licht-)Wellenzüge mit zufälligen Phasen, d.h., die Laseratome, als oszillierende Dipole betrachtet, oszillieren in völlig stochastischer Weise, und der Laser arbeitet als eine gewöhnliche Lampe, m.a.W. das Lichtfeld ist aus einer Vielzahl von verschiedenen Wellenzügen in Form von unterschiedlichen Frequenzen und Phasen zusammengesetzt. Wird nun der Laser mit hinreichend permanenter elektrischer Energie versorgt und damit im thermischen Ungleichgewicht gehalten, bewirkt dies auf einer makroskopischen Skala eine Kooperation der atomaren Dipole, die jetzt in Phase oszillieren, sodaß dies für den hohen Kohärenzgrad des Laserlichts verantwortlich ist, d.h., auf Grund der besonderen Konstruktion der Laserapparatur kann ein bestimmter kohärenter Lichtwellenzug – eine sog. „(Feld-)Mode“ – anhand der Spiegelausrichtung und des -abstandes hinreichend lange im (Ring-)Laser verbleiben, sodaß sie, da die Laserelektronen ihre Energie mit einem meist ganz kleinen Vorzug an eine bestimmte Lichtwelle abgeben, auf diese Weise einen kleinen Vorteil gegenüber den anderen Wellenzügen erhält, um sich selbst – nichtlinear – zu verstärken, und damit alle anderen ständig neu angeregten Laserelektronen nach und nach zwingen kann, ihre Lichtwellen mit gleicher Phase zu emittieren. Somit „versklavt“ diese unter den kritischen Moden selektierte dominante Mode, als ein „Ordnner“, die einzelnen Laserelektronen, die umgekehrt – im Rahmen einer zirkulären Kausalität – durch ihr gleichmäßiges Schwingen erst die Lichtwelle hervorbringen.

Eingehend s. z.B. H. HAKEN: *Synergetics. Introduction and Advanced Topics*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. PP. 229-74 (dt.: *Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie*. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. (1982) 1990. S. 235-74, v.a. S. 235-38 mit den entsprechenden Feld- und Materie-

tics")¹⁶⁹ begründet, ein Ansatz zu einer allgemeinen „Lehre vom Zusammenwirken“¹⁷⁰ einer Vielzahl von Systemelementen auf einer Mikroebene, wonach die selektiven Selbstorganisationsprozesse von nicht-linearen, ordnungsbildenden Systemen auf einer Makroebene dadurch beschrieben werden können, daß es im Rahmen von Rückkopplungskreisläufen zu einer „lawinenartigen“ Selbstverstärkung von bereits bestehenden Schwankungen (sog. „Fluktuatio-

gleichungen (8.1-8.4)) – H. HAKEN: Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. 1st Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1988. PP. 24-26, 69-74, 135-40.

Einführend s. z.B. H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 164-69.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991. S. 61-72 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 100-104.

¹⁶⁹ Grundlegend s. z.B. H. HAKEN: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004 (dt.: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. (1982) 1990).

S. auch H. HAKEN: Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. 2nd Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2000 – H. HAKEN / A. MIKHAILOV (Eds.): Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993 – H. HAKEN (Ed.): Synergetics. Cooperative Phenomena in Multikomponent Systems. Proceedings of the Symposium on Synergetics from April 30 to May 6, 1972, Schloß Elmau. Teubner. Stuttgart. 1973.

Zur Synergetik i.V.m. der Neuro- und Kognitionswissenschaft s. z.B. H. HAKEN: Brain Dynamics. An Introduction to Models and Simulations. 2nd Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. (2002) 2008 – H. HAKEN: Principles of Brain Functioning. A Synergetic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognition. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 1996 – H. HAKEN: Synergetic Computers and Cognition: A Top-Down Approach to Neural Nets. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1991 – H. HAKEN: Synergetics as a Tool for the Conceptualization and Mathematization of Cognition and Behaviour – How Far Can we Go? In: H. HAKEN / M. STADLER (Eds.): Synergetics of Cognition. Proceedings of the International Symposium at Schloß Elmau, Bavaria, June 4-8, 1989. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990. PP. 2-31.

S. auch H. HAKEN / M. STADLER (Eds.): Synergetics of Cognition. Proceedings of the International Symposium at Schloß Elmau, Bavaria, June 4-8, 1989. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990 – E. BAŞAR / H. FLOHR / H. HAKEN / A.J. MANDELL (Eds.): Synergetics of the Brain. Proceedings of the International Symposium on Synergetics at Schloß Elmau, Bavaria, May 2-7, 1983. Springer-Verlag. Berlin. u.a. 1983.

S. auch E. BAŞAR: Brain Function and Oscillations. I: Brain Oscillations, Principles and Approaches. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998 – E. BAŞAR: Brain Function and Oscillations. II: Integrative Brain Function. Neurophysiology and Cognitive Processes. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999.

Zur Synergetik i.V.m. der Psychologie s. z.B. H. HAKEN / G. SCHIEPEK: Synergetik in der Psychologie. Selbstorganisation verstehen und gestalten. 2. Aufl. Hogrefe Verlag. Göttingen u.a. 2010.

Einführend s. z.B. H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75.

1988. S. 163-72 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik II. Naturwissenschaften. Bd. 75.

1988. S. 225-34 – H. HAKEN: Synergetic Computers and Cognition: A Top-Down Approach to Neural Nets. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1991. PP. 20-35.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991 – H. HAKEN: Selbstorganisation in physikalischen Systemen. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 163-80 – H. HAKEN / R. GRAHAM: Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken. Was verbindet die Physik, Chemie

nen“ (engl. “fluctuations”)¹⁷¹ kommt, sodaß eine Auslese (sog. „Selektion“ (engl. “selection”)) einer begrenzten Anzahl von bestimmten kohärenten Systemverhaltensmustern (sog. „(Feld-)Moden“ (engl. “(field) modes”))¹⁷² vorgenommen wird, und damit die gesamte Systemdynamik – über einem bestimmten Bereich der kritischen Systeminstabilität – im Rahmen des sog. „Versklavungsprinzips“ (engl. “slaving principle”)¹⁷³ nur anhand einer geringen Anzahl von Systemvariablen, den sog. „Ordnungsparametern“ (engl. “order parameter”)¹⁷⁴, bestimmt werden kann.

und Biologie? Umschau in Wissenschaft und Technik. Bd. 6. 1971. S. 191-95 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 100-109 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006. S. 79-83, 86-88 – Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2005. S. 2-9, v.a. S. 5 – U. SKIRKE: Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunftsfähigen Fortschrittsbegriffs. Dissertation. Universität Hamburg. 1997. Kap. 2.2, 2.4.

170 S. z.B. H. HAKEN / R. GRAHAM: Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken. Was verbindet die Physik, Chemie und Biologie? Umschau in Wissenschaft und Technik. Bd. 6. 1971. S. 191-95 – H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991. v.a. S. 17.

171 S. z.B. H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag . Berlin u.a. (1982) 1990. S. 13, 109-13 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 170 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik II. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 225, 227, 228, 232, 233.

172 S. z.B. H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag . Berlin u.a. (1982) 1990. S. 14-15, 122-23, 235-38 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 168-69, 171.

173 Dabei bedingen sich zwei Aspekte des Selbstorganisationsprozesses wechselseitig, u.z., zum einen die Herausbildung von kohärenten, makroskopischen Ordnungsmustern anhand des synchronisierten Verhaltens der Systemkomponenten der Mikroebene, und, zum anderen, wird jedoch zugleich die Verhaltensweise der individuellen Systemkomponenten erst durch den dominanten Ordnungsparameter der Makroebene erzwungen.

Eingehend s. z.B. H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag . Berlin u.a. (1982) 1990. S. 237-38.

Einführend s. z.B. H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik II. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 231-34.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991. S. 20, 60 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 103-104 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006. S. 80 – H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 157.

174 Die dominante Mode(-amplitude) wird dabei zu einem im Rahmen eines Wettbewerbs siegenden Ordnungsparameter, der die anderen konkurrierenden Moden unterdrückt, und das atomare System damit „versklavt“, was aber auf Grund von mikroskopischen, stochastischen Fluktuationen nicht immer vorausgesagt werden kann, was auch als sog. „Bifurkation“ (engl.

1.25.03 Seit den sechziger Jahren des 20. Jhdts hat der Bio- und Physikochemiker Manfred EIGEN¹⁷⁵, später zusammen mit dem österreichischen theoretischen Chemiker Peter SCHUSTER¹⁷⁶, seine sog. „Theorie der (autokatalytischen) Hyperzyklen“ (engl. “(autocatalytic) hypercycle theory”)¹⁷⁷ entwickelt, wonach die Entstehung, die Speicherung, die Verarbeitung und die (Selbst-)Erhaltung von biologischer Information in biomolekularen Systemen verstanden werden kann als ein Resultat von nicht-linearen, autokatalytischen Selbstorganisationsprozessen zwischen den RNS-Sequenzen (engl. “RNA sequences”) und den Proteinen mit enzymatischen Funktionen, sodaß erstere als ein Informationsträger und letztere als ein Funktionsträger im Rahmen von „operational geschlossenen“, selbstinstruktiven und selbstreproduktiven Biosynthese(-reaktions-)zyklen, dem sog. „Hyperzyklus“ (engl. “Hypercycle”)¹⁷⁸, miteinander

“bifurcation”) bezeichnet wird.

Eingehend s. z.B. H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. (1982) 1990. S. 15-16, 237-73, v.a. S. 237-38 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 172 – H. HAKEN: Entwicklungslinien der Synergetik II. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 225, 226, 227, 232, 233.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet H. HAKEN: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991. S. 19-20, 58, 68 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 102-104.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.231, Fn. 114.

175 Zur Person Manfred EIGEN's siehe die Website http://www3.mpibpc.mpg.de/cgi-bin/person.cgi?nav=kontakt&persId=163874&lang=de&inst=biophysikalische_chemie&from=institut.

176 Zur Person Peter SCHUSTER's siehe die Website <http://www.tbi.univie.ac.at/~pks/>.

177 Grundlegend s. z.B. M. EIGEN: Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften. Vol. 58. 1971. PP. 465-523 – M. EIGEN: Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution. Quarterly Reviews of Biophysics. Vol. 4. 1971. PP. 149-212 – M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Selforganization. Springer-Verlag. 1979.

Eingehend s. z.B. M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part A: Emergence of the Hypercycle. Naturwissenschaften. Bd. 64. 1977. S. 541-65 – M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part B: The Abstract Hypercycle. Naturwissenschaften. Bd. 65. 1978. S. 7-41 – M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part C: The Realistic Hypercycle. Naturwissenschaften. Bd. 65. 1978. S. 341-69.

S. auch M. EIGEN: Selection and the Origin of Information. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 35-46, v.a. PP. 39-43.

Einführend s. z.B. M. EIGEN: Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie. Piper. München u.a. 1987. S. 225-37 – St. KAUFFMAN: The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 357-67, v.a. PP. 357-60.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet Fr. CRAMER: Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen. 3. Aufl. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH. Stuttgart. (1988) 1989. S. 125-31 – W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band III. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 209-47 – A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 109-16.

178 Ein katalytischer sog. „Hyperzyklus“ (engl. “Hypercycle”) besteht dabei aus einer bestimmten Anzahl von kreisförmig angeordneten, kombinierten katalytischen Zyklen, bestehend aus n RNS-Sequenzen, die als Informationsträger I_1, \dots, I_n fungieren und zwei Funktionen erfüllen müssen,

derart verschränkt sind, daß die selektive Selbstorganisation der biomolekularen Materie offene biochemische Nichtgleichgewichtssysteme i.S. I. PRIGOGINE's und P. GLANSDORFF's generiert.¹⁷⁹

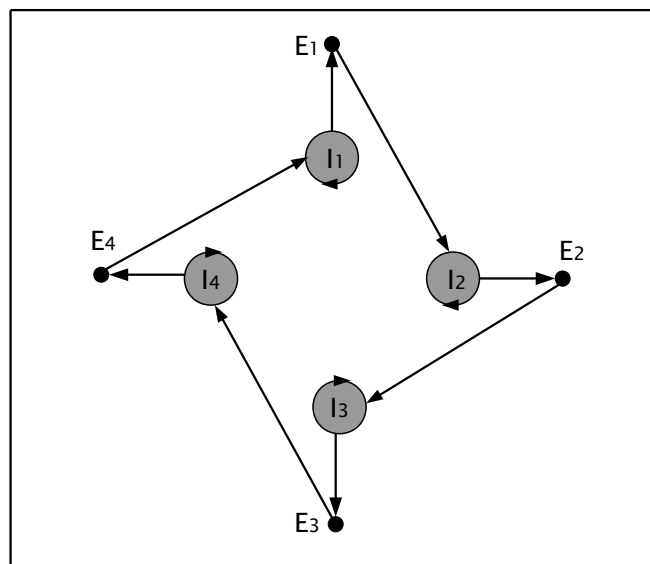
1.25.04 Seit den sechziger Jahren des 20. Jhdts hat sich der U.S.-amerikanische theoretische Biologe Stuart A. KAUFFMAN¹⁸⁰ mit diversen (Computersimulations-)Modellen zur Analyse von adaptiven, dynamischen und komplexen

u.z. derart, daß jeweils ein bestimmter Informationsträger I_k , erstens, die Funktion besitzt, sich selbst zu reproduzieren, und, zweitens, ein von ihm erzeugtes (Zwischen-)Produkt zu kodieren, d.h. i.d.R. ein Enzym mit der Struktur E_k , das dann den darauffolgenden katalytischen Zyklus unterstützt, z.B. bei der Reproduktion des Informationsträgers I_{k+1} als Katalysator dient, sowie davor das Enzym E_{k-1} katalytisch die Reproduktion des Informationsträgers I_k unterstützt hatte, sodaß sich insgesamt der ganze Hyperzyklus fortwährend reproduziert (s. Graphik.04).

Eingehend s. z.B. M. EIGEN: Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften. Vol. 58. 1971. S. 503-505 – M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Springer-Verlag. 1979. PP. 1-90, v.a. PP. 2-6 – M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part A: Emergence of the Hypercycle. Naturwissenschaften. Bd. 64. 1977. S. 542-46.

Einführend s. z.B. Fr. CRAMER: Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen. 3. Aufl. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH. Stuttgart. (1988) 1989. S. 127-31 – W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band III. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 243-45.

S. auch Kl. MAINZER: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röhl-Verlag. Bonn. 2005. S. 6.



Graphik.04: Schematische Darstellung eines sog. „Hyperzyklus“ (engl. „Hypercycle“) mit vier Polynukleotiden I_1, \dots, I_4 als Informationsträgern und vier Polypeptiden (Enzymen) E_1, \dots, E_4 als Katalysatoren (in Anlehnung an M. EIGEN / P. SCHUSTER: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Springer-Verlag. 1979. P. 50 und M. EIGEN: Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften. Vol. 58. 1971. S. 504).

179 S. M. EIGEN: Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften. Vol. 58. 1971. S. 471-73, v.a. P. 471: „Under what Environmental Conditions can

Systemen vor allem in der Evolutionsbiologie befaßt¹⁸¹, z.B. mit seinem sog. "NK Adaptive Landscape Model"¹⁸², und dabei die These aufgestellt, daß im Rahmen der DARWINschen biogenetischen Evolution den Mechanismen der Selbstorganisationsdynamik – neben den klassischen Faktoren – eine wesentliche Bedeutung beigemessen werden kann¹⁸³: Die Selbstorganisation eines dynamischen Systems, z.B. eines Genotyps, kann dahingehend analysiert werden, daß anhand von (stochastischen) Algorithmen in sog. „Booleschen Dynamischen Netzwerken“ (engl. "Boolean Dynamical Networks")¹⁸⁴ mit den entsprechenden abstrakten optimierten (Fitness-)Landschaften (engl. "(fitness) landscapes")¹⁸⁵ erklärt werden kann, wie aus, z.B. genetischen, lokalen Interaktionen von elementaren Systemelementen, z.B. den Genen, eine glo-

Selforganization Occur?

One fundamental answer was given by E. Schrödinger (...) who wrote: 'Living matter evades the decay to equilibrium'. Equilibrium (in an isolated system) is a state of maximum entropy. If we keep the system away from equilibrium, we have to compensate steadily for the production of entropy, which means we have to 'feed' the system with free energy or energy-rich matter. This energy is used by the machinery to 'drive' certain reactions which keep the system from 'fading away' into the inert or 'dead' state of equilibrium."

180 Zur Person Stuart A. KAUFFMAN's siehe die Website <http://www.cs.tut.fi/sgn/csb/Kauffman/>.

181 Grundlegend s. z.B. St.A. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 1993 – St.A. KAUFFMAN / S. LEVIN: *Towards a General Theory of Adaptive Walks on Rugged Landscapes*. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 128. 1987. PP. 11-45.

Eingehend s. z.B. St. KAUFFMAN: *Emergent Properties in Random Complex Systems*. *Physica*. D. 10 D. 1984. PP. 146-56.

Einführend s. z.B. St.A. KAUFFMAN: *Anti-Chaos and Adaptation*. *Scientific American*. Vol. 265. 1991. PP. 78-84.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten St.A. KAUFFMAN: *At Home in the Universe. The Search of the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press. New York u.a. 1995 – St. KAUFFMAN: *Investigations*. Oxford University Press. Oxford. 2000 – St.A. KAUFFMAN: *Reinventing the Sacred: A New View of Science, Reason, and Religion*. Basic Books. New York. 2008.

182 Eingehend s. hierzu z.B. St.A. KAUFFMAN / S. LEVIN: *Towards a General Theory of Adaptive Walks on Rugged Landscapes*. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 128. 1987. PP. 11-45, v.a. PP. 18-24 – St. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 33-67.

Einführend s. z.B. St.A. KAUFFMAN: *At Home in the Universe. The Search of the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press. New York u.a. 1995. PP. 169-80, 192-99, 252-64 – St. KAUFFMAN: *Investigations*. Oxford University Press. Oxford. 2000. PP. 194-207.

183 S. z.B. St. KAUFFMAN / R.K. LOGAN / R. ESTE / R. GOEBEL / D. HOBILL / I. SHMULEVICH: *Propagating Organization: An Enquiry*. *Biology & Philosophy*. 2007. PP. 1-19.

184 S. z.B. St. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 181-209, 209-21.

Einführend s. z.B. Chr. STOICA-KLÜVER / J. KLÜVER / J. SCHMIDT: *Modellierung komplexer Prozesse durch naturalogische Verfahren. Komplexe adaptive Verfahren – Modellbildungen und -theorie – neuronale Netze – Soft Computing und verwandte Techniken*. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2009. S. 35-46.

Zu den Implikationen für die Theorie der künstlichen neuronalen Netzwerke s. z.B. St. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 227-30, 393-95.

185 S. z.B. St. KAUFFMAN: *The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 36-40.

bale Ordnungsstruktur entsteht.

1.25.05 Mit seinen Vorarbeiten¹⁸⁶ im Rahmen von neuroanatomischen Forschungen seit dem Ende der fünfziger Jahren des 20. Jhdts. hat der chilenische (Neuro-)Biologe und Philosoph Humberto R. Maturana¹⁸⁷, später in den siebziger Jahren des 20. Jhdts. zusammen mit dem chilenischen (Neuro-)Biologen Francisco J. Varela¹⁸⁸ und Rafael Uribe, das Konzept der sog. „Autopoiesis“ (engl. „Autopoiesis“)¹⁸⁹ entwickelt, das die grundlegenden Organisa-

186 S. z.B. J.Y. Lettvin / H.R. Maturana / W.S. McCulloch / W.H. Pitts: What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. Vol. 47. 1959. PP. 1940-51 (Reprinted in: W.C. Cornin / M. Balaban (Eds.): The Mind: Biological Approaches to its Functions. Interscience Publ. New York u.a. 1968. PP. 233-58) – H.R. Maturana: Neurophysiology of Cognition. In: P. Garvin (Ed.): Cognition – A Multiple View. New York, Washington. 1970. PP. 3-23 – H.R. Maturana: Biology of Cognition. BCL-Report Nr. 9.0. 1970. PP. 1-27.

187 Zur Person Humberto R. Maturana's siehe die Website <http://www.matriztica.cl/>.

188 Zur Person Francisco J. Varela's siehe die Website http://www.franzreichle.ch/images/Francisco_Varela/index.html.

189 Grundlegend s. z.B. Fr.G. Varela / H.R. Maturana / R. Uribe: Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model. Biosystems. Vol. 5. 1974. PP. 187-96, v.a. PP. 188-89: "The autopoietic organization is defined as a unity by a network of productions of components which (i) participate recursively in the same network of productions of components which produced these components, and (ii) realize the network of productions as a unity in the space in which the components exist. Consider for example the case of a cell: it is a network of chemical reactions which produce molecules such that (i) through their interactions generate and participate recursively in the same network of reactions which produced them, and (ii) realize the cell as a material unity. Thus the cell as a physical unity, topographically and operationally separable from the background, remains as such only insofar as this organization is continuously realized under permanent turnover of matter, regardless of its changes in form and specificity of its constitutive chemical reactions."

Eingehend s. z.B. H.R. Maturana: The Organization of the Living: A Theory of the Living Organization. International Journal of Man-Machine Studies. Vol. 7. 1975. PP. 313-32 – H.R. Maturana / Fr. Varela: Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization. University of Illinois. Urbana/III. 1975 – Fr. Varela: Principles of Biological Autonomy. North Holland. New York, Oxford. 1979 – H.R. Maturana / Fr. Varela: Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. D. Reidel. Boston, Dordrecht u.a. 1980 – H.R. Maturana: Autopoiesis: Reproduction, Heredity and Evolution. In: M. Zeleny (Ed.): Autopoiesis, Dissipative Structure, and Spontaneous Social Orders. Westview Press. Boulder/CO. 1980. PP. 45-79.

Einen erweiterten Logik-Kalkül zur Formalisierung der Selbstbezüglichkeit (engl. "self-reference") im Anschluß an G. Spencer-Brown: The Laws of Form. Allen and Unwin. London. 1969 entwickelt Fr. Varela: A Calculus for Self-Reference. International Journal of General Systems. Vol. 2. 1975. PP. 5-24 – Fr. Varela: Principles of Biological Autonomy. North Holland. New York, Oxford. 1979. PP. 106-21, 122-69.

Einführend s. z.B. M. Zeleny: Autopoiesis: A Paradigm Lost? In: M. Zeleny (Ed.): Autopoiesis, Dissipative Structure, and Spontaneous Social Orders. Westview Press. Boulder/CO. 1980. PP. 3-43 – S.J. Schmidt: Der Radikale Konstruktivismus: Ein neues Paradigma im interdisziplinären Diskurs. In: S.J. Schmidt (Hrsg.): Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus. Suhrkamp Verlag. Frankfurt. 1987. S. 21-26 – M. Zeleny: What is Autopoiesis? In: M. Zeleny (Ed.): Autopoiesis: A Theory of the Living Organizations. North Holland. New York 1981. PP. 4-17, v.a. P. 6 – Chr. Weiss: Die Information der Autopoiesis. In: D. Baecker: Schlüsselwerke der Systemtheorie. Verlag für Sozialwiss. Wiesbaden. 2005. S. 243-52 – W. Krohn / H. Cruse: Das Prinzip der Autopoiesis. In: D. Baecker: Schlüsselwerke der Systemtheorie. Verlag für Sozialwiss. Wiesbaden. 2005. S. 281-89.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet A. Paslack: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 151-65.

tionsprinzipien von lebenden, selbstorganisierten Systemen beschreibt. Ausgehend von einer nicht-reduktionistischen, mechanistischen (Re-)Konstruktionsmethode anhand von kausalen sog. „generativen Mechanismen“ (engl. „generative mechanisms“)¹⁹⁰ betonen die Autoren vor allem die selbstreferentielle, operationale Geschlossenheit von (neuro-)biologischen Systemen, wonach ein (neuro-)kognitiver Prozeß dadurch gekennzeichnet ist, daß nicht nur vermeintlich objektive physikalische Informationen aus der Umwelt kodiert bzw. repräsentiert werden, sondern das Lebewesen selbst mit Bezug auf seine eigene interne strukturelle, (neuro-)biologische Systemorganisation die Art und Weise der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -bewertung bestimmt, und damit erst den für ihn relevanten (Sinn-)Kontext erzeugt (sog. „Strukturterminiertheit von (neuro-)kognitiven Prozessen“).¹⁹¹ Folglich wird das klassische Repräsentationskonzept durch das der sog. „strukturellen Kopplung“ (engl. „structural coupling“)¹⁹² ersetzt, wobei das Nervensystem als plastisches, strukturdeterminiertes dynamisches System aufgefaßt wird, das unter beständigen (Stör-)Einflüssen bzw. (Stör-)Einwirkungen von äußeren und inneren Umgebungsbedingungen seine Informationsinterpretation vorwiegend anhand seiner jeweils aktuellen, systemintern determinierten (Struktur-)Zustandsveränderungen vornimmt.

1.25.06 Sich gründend auf die sog. „General Systems Theory (GST)“ L. von BERTALANFFY's¹⁹³, stellt die seit den siebziger Jahren des 20. Jhdts. entstandene sog. „Systemtheorie der Evolution“ (engl. „System Theory of Evolution“)¹⁹⁴,

190 S. z.B. H.R. Maturana: Wissenschaft und Alltagsleben: Die Ontologie der wissenschaftlichen Erklärung. In: W. Krohn / G. Küppers (Hrsg.): Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution. Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden. 1990. S. 107-38, v.a. S. 115-23.

S. auch H.R. Maturana: Biology of Cognition. BCL-Report Nr. 9.0. 1970 – Fr. Varela: Principles of Biological Autonomy. North Holland, New York, Oxford. 1979. P. 4.

191 S. z.B. H.R. Maturana / G. Uribe / S.G. Frenk: A Biological Theory of Relativistic Colour Coding in the Primate Retina. In: Archivos de Biología y Medicina Experimentales. Suplemento No. 1. Santiago. 1968. PP. 1-30 (dt.: Eine biologische Theorie der relativistischen Farbkodierung in der Primatenretina. In: H. Maturana: Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden. 1982. S. 88-137, v.a. S. 135-37).

192 S. z.B. H.R. Maturana: The Organization of the Living: A Theory of the Living Organization. International Journal of Man-Machine Studies. Vol. 7. 1975. PP. 318-19, 326-28 – H.R. Maturana / Fr. Varela: Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization. University of Illinois, Urbana/III. 1975 (dt.: Autopoietische Systeme. Eine Bestimmung der lebendigen Organisation. In: H. Maturana: Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden. 1982. S. 228-29, 231-33).

193 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

194 Grundlegend s. z.B. R. Riedl: Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution. Piper, München, Zürich. (1975) 1990.

Eingehend s. z.B. G.P. Wagner: Über die populationsgenetischen Grundlagen einer Systemtheorie der Evolution. In: J. Ott / G.P. Wagner / Fr. Wuketits (Hrsg.): Evolution, Ordnung und Erkenntnis. Parey, Berlin u.a. 1985. S. 97-111 – R. Riedl: The System Theory of Evolution. In: F. Schmidt (Hrsg.): Neodarwinistische oder Kybernetische Evolution? Bericht über ein internationales Symposium vom 15.-17. Juli 1987 in Heidelberg. Universitätsdruckerei, Heidelberg. 1988. S. 4-29 – R. Riedl: Systems Theory of Evolution. Evolution and Cognition. Vol. 9. 2003. PP. 31-42 – G.P. Wagner: On the Necessity of a Systems Theory of Evolution and its Population Biologic Founda-

vertreten vor allem durch den österreichischen Zoologen Rupert RIEDL¹⁹⁵, den Zoologen und Evolutionsbiologen Günter P. WAGNER¹⁹⁶ und den Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Franz M. WUKETITS¹⁹⁷, eine ergänzende Weiterentwicklung der sog. „Synthetischen Evolutionstheorie“ (engl. “Synthetic Theory of Evolution”)¹⁹⁸ i.S. des deutsch-U.S.-amerikanischen Biologen Ernst MAYR's¹⁹⁹ dar: Sie postuliert, daß die Evolution von lebenden Organismen, die – als offene Systeme i.S. L. von BERTALANFFY's²⁰⁰ – in einem beständigen Fließgleichgewicht mit der (System-)Umwelt stehen, zu einem viel höheren Grad von den internen „funktionellen Systembedingungen in der Organisation der Organismen selbst diktiert wird.“²⁰¹ Dieses Konzept einer synorganisierten²⁰² Evolution weist dabei mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie nach, daß neben den äußeren Systembedingungen in Form des kausalen Mechanismus der Selektion i.S. Ch. DARWIN's vorwiegend die inneren Systembedingungen in Form einer internen Mutation und Selektion zu einer optimal adaptierten Funktionalität der Subsysteme eines Organismus beitragen, und, unter Einbeziehung von „Wechselabhängigkeiten“ des Gesamtsystems, dies von der unzureichenden Annahme einer linearen Kausalität zu einem Denken in nicht-linearer, „vernetzter oder funktioneller Kausalität“ führt²⁰³, sodaß den or-

tions: Comments on Dr. Regelman's Article. *Acta Biotheoretica*. Vol. 32. 1983. PP. 223-26.

Einführend s. z.B. R. RIEDL: *Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 290-96 – Fr.M. WUKETITS: “Systems Everywhere”.

Aspekte einer biologischen Systemtheorie. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): *Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie*. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 44-50 – Fr.M. WUKETITS: *Grundriß der Evolutionstheorie*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1982. S. 132-40, v.a. S.

135-38 – Fr.M. WUKETITS: *Die Systemtheorie der Evolution – eine neue Sehweise der Entwicklung des Lebendigen*. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*. Bd. 34. 1981. S. 1-7.

195 Zur Person Rupert RIEDL's siehe die Website <http://rupertriedl.org/>.

196 Zur Person Günter P. WAGNER's siehe die Website <http://www.yale.edu/eeb/wagner/>.

197 Zur Person Franz M. WUKETITS's siehe die Website <http://www.kli.ac.at/franz-wuketits>.

198 Eingehend s. z.B. E. MAYR: *Systematics and the Origin of Species. From the Viewpoint of a Zoologist*. Dover. New York. (1942) 1964 – J. HUXLEY: *Evolution – the Modern Synthesis*. MIT Press. Cambridge/MA. (1942) 2010.

Einführend s. z.B. E. MAYR: *What Evolution is*. Basic Books. New York. 2001 – R. RIEDL: *Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 284-90 – Th. JUNKER: *Die zweite Darwinsche Revolution. Geschichte des Synthetischen Darwinismus in Deutschland 1924 bis 1950*. Basilisken-Presse. Marburg 2004. S. 35-67 – Fr.M. WUKETITS: *Grundriß der Evolutionstheorie*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1982. S. 38-43.

199 Zur Person Ernst MAYR's siehe die Websites <http://web.archive.org/web/20080512171612/> und <http://home.datacomm.ch/biografien/biografien/mayr.htm>.

200 S. R. RIEDL: *Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 39, 110-117, v.a. S. 112.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

201 S. R. RIEDL: *Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution*. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 346-55, v.a. S. 347.

202 S. R. RIEDL: *Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution*. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 385.

203 S. R. RIEDL: *Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution*. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 346-55, v.a. S. 348, 352, 353, S. 359-61.

In R. RIEDL: *Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens*. Springer.

ganismischen Funktionsmustern ganz bestimmte Konstruktionsprinzipien zu Grunde liegen, wie z.B. das Homologie- und Typuskonzept, die von R. RIEDL auch als „(evolutionäre, funktionelle oder genetische usw.) Bürden“²⁰⁴ bezeichnet werden.²⁰⁵

1.25.07 Beeinflußt von der sog. "General Systems Theory (GST)" L. von BERTALANFFY's²⁰⁶ und dem mathematischen Strukturalismus i.S. N. BOURBAKI's²⁰⁷, entwickelte seit den zwanziger Jahren des 20. Jhdts. der schweizerische Entwicklungspsychologe Jean PIAGET²⁰⁸ die Stadien-theorie im Rahmen seiner strukturalistischen Kognitionstheorie²⁰⁹ und seiner Genetischen Erkenntnistheorie²¹⁰, wonach sich die kognitive Entwicklung eines Kindes in vier verschiedenen (kognitiven) Stadien (engl. "stages, periods") vollzieht, u.z., (1) das sensorische Stadium, (2) das präoperative Stadium, (3) das konkret-operative Stadium und (4) das formal-operative Stadium. Dabei wird die kognitive Organisation von Wissen als ein subjektiv gefilterter, konstruktiver und adaptiver Pro-

Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 290 wird auch der Ausdruck „rekursive Kausalität“ verwendet.

204 S. R. RIEDL: Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 351-52 – R. RIEDL: Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 290.

205 S. R. RIEDL: Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 362-69.

S. auch R. RIEDL: Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000. S. 37-40, 139-81.

206 S. z.B. R.L. FETZ: Struktur und Genese. Jean Piagets Transformation der Philosophie. Haupt. Bern u.a. 1988. S. 42-52, v.a. S. 46, S. 178-80, v.a. S. 180, S. 223-25, v.a. S. 224 – W.F. OVERTON: General Systems, Structure and Development. In: K.F. RIEGEL / G.C. ROSENWALD (Eds.): Structure and Transformation. Developmental and Historical Aspects. Wiley. New York u.a. 1975. PP. 61-81, v.a. PP. 69-73.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.24.01.

207 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.211, Fn. 47.

208 Zur Person Jean PIAGET's siehe die Website <http://www.piaget.org/aboutPiaget.html>.

209 Grundlegend s. z.B. J. PIAGET: Gesammelte Werke. Bd. 1-8. Studienausgabe. Klett. Stuttgart. 1975.

Eingehend s. z.B. J. PIAGET / B. INHELDER: The Psychology of the Child. Basic Books. New York. 1969 (dt.: Die Psychologie des Kindes. Walter. Olten, Freiburg i.Br. 1972) – R.L. FETZ: Struktur und Genese. Jean Piagets Transformation der Philosophie. Haupt. Bern u.a. 1988.

Einführend s. z.B. R. SIEGLER / J. DeLOACHE / N. EISENBERG: How Children Develop. 3rd Ed. Worth Publishers. (dt.: Entwicklungspsychologie im Kindes- und Jugendalter. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011. S. 128-42) – H.J. GINSBURG / S. OPPER: Piaget's Theory of Intellectual Development. 2nd Ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1979. PP. 29-68, 153-59, 178-205

– L. MONTADA: Die geistige Entwicklung aus der Sicht Jean Piagets. In: R. OERTER / L. MONTADA (Hrsg.): Entwicklungspsychologie. Ein Lehrbuch. Beltz Verlag, Psychologie Verlags Union. Weinheim. 1995. S. 518-60 – P. MILLER: Theories of Developmental Psychology. 5th Ed. Worth Publishers. 2011. PP. 27-104 (dt.: Theorien der Entwicklungspsychologie. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1993. S. 45-111) – H.M. TRAUTNER: Lehrbuch der Entwicklungspsychologie. Bd. 2: Theorien und Befunde. 2. Aufl. Hogrefe. Göttingen u.a. 1991. S. 157-92.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten z.B. Th. KESSELRING: Jean Piaget. Verlag C.H. Beck. München 1988 – I. SCHARLAU: Jean Piaget zur Einführung. Junius Verlag. Hamburg 1996.

210 S. z.B. J. PIAGET: Genetic Epistemology. Columbia University Press. New York, London. 1970 (dt.: Einführung in die genetische Erkenntnistheorie. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1973).

S. einführend z.B. R.L. FETZ: Struktur und Genese. Jean Piagets Transformation der Philosophie. Haupt. Bern u.a. 1988. S. 24-41, 53-169.

zeß aufgefaßt, wobei dieser altersbedingte Prozeß der kognitiven Adaptation, d.h. der Anpassung des (kindlichen) Denkens und der entsprechenden strukturierten Verhaltensmuster (sog. „Schemata“ i.S. einer kognitiven Struktur²¹¹) auf einer psychologischen Ebene an seine Umwelt, anhand von zwei komplementären Prozessen beschrieben werden kann, der sog. „Assimilation“ (engl. „assimilation“) und der sog. „Akkommodation“ (engl. „accommodation“).²¹² Dadurch, daß ein Kind als ein aktiver, sich selbst regulierender Organismus betrachtet wird, besteht demnach eine beständige Tendenz zu einer ausgeglichenen Koordination dieser beiden Adaptationsmoden hin zu einem dynamischen Gleichgewicht (sog. „Äquilibration“ (engl. „equilibration“)).²¹³

1.25.08 Sich gründend vor allem auf den Ansatz der sog. „Synergetik“ (engl. „synergetics“) H. HAKEN's²¹⁴ und die sog. „Theorie der dissipativen Strukturen“ (engl. „theory of dissipative structures“) I. PRIGOGINE's²¹⁵, befassen sich seit den neunziger Jahren des 20. Jhdts der Psychologe Günter SCHIEPEK²¹⁶, der Psychologe und Wirtschaftswissenschaftler Guido STRUNK²¹⁷ sowie der Psychologe und Psychotherapeut Wolfgang TSCHACHER²¹⁸ mit der sog. „Systemi-

211 Zum Begriff der sog. „Struktur“ bei J. PIAGET s. z.B. R.L. FETZ: Struktur und Genese. Jean Piagets Transformation der Philosophie. Haupt. Bern u.a. 1988. S. 214-26 – H.M. TRAUTNER: Lehrbuch der Entwicklungspsychologie. Bd. 2: Theorien und Befunde. 2. Aufl. Hogrefe. Göttingen u.a. 1991. S. 162-64.

212 S. im einzelnen hierzu z.B. P. MILLER: Theorien der Entwicklungspsychologie. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1993. S. 50-51, 52-53, 78-80, 109-10, v.a. S. 78, 79: Unter der sog. „Assimilation“ versteht man dabei „denjenigen Prozeß, in dem das Individuum die Realität in seine aktuelle kognitive Organisation einpaßt. Bei jeder kognitiven Auseinandersetzung mit Objekten oder Phänomenen verbiegen oder verzerren Menschen ihre jeweilige Erfahrung bis zu einem gewissen Grad, um diese Erfahrung einbeziehen, verstehen oder interpretieren zu können. Das heißt, sie wenden ihr Wissen an, um die Eigenschaften von Objekten oder Phänomenen sowie deren Beziehungen untereinander zu verstehen.“

Unter der sog. „Akkommodation“ versteht man demgegenüber „die andere Seite der Medaille. Sie beinhaltet Anpassungen der kognitiven Organisation an die Erfordernisse der Wirklichkeit. Jedes Objekt oder Phänomen besitzt spezifische Eigenschaften, die früher oder später berücksichtigt werden müssen. Die Akkommodation tritt gewissermaßen deshalb auf den Plan, weil ein spezifisches Objekt oder Phänomen sich mit den vorhandenen Strukturen nicht hinreichend interpretieren läßt. Die daraus resultierende Neuorganisation des Denkens führt zu einer anders gearteten und befriedigenderen Anpassung der jeweiligen Erfahrung. Ein spezifischer Stimulus wird nie zweimal in genau derselben Weise erfahren.“

213 S. z.B. H.J. GINSBURG / S. OPPER: Piaget's Theory of Intellectual Development. 2nd Ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1979. PP. 214-18 – P. MILLER: Theorien der Entwicklungspsychologie. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1993. S. 80-82, 109-10.

214 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

215 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

216 Zur Person Günter SCHIEPEK's siehe die Websites <http://www.pmu.ac.at/de/926.htm> und <http://www.systemisch-forschen.de/node/210>.

217 Zur Person Guido STRUNK's siehe die Websites <http://bach.wu.ac.at/bachapp/cgi-bin/fides/fides.aspx/fides.aspx?search=true;person=true;show=pub;tid=4451;lang=DE>, http://www.wiso-tu-dortmund.de/wiso/wd/en/acrossbe/3_members/2_strunk/index.html und <http://www.complexity-research.com/ComplexityICh.htm>.

218 Zur Person Wolfgang TSCHACHER's siehe die Websites <http://www.upd.unibe.ch/research-staff/tschacher.html> und <http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/-Prof-Dr-phil-Wolfgang-Tschacher.6836.0.html>.

schen Psychologie²¹⁹, wobei versucht wird, die (mathematischen) Methoden der sog. „Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme“ (engl. “theory of nonlinear dynamical systems”)²²⁰ auf die (klinische) Psychologie, die Psychotherapie und Psychiatrie anzuwenden, z.B. anhand einer sog. „(nichtlinearen) Zeitreihenanalyse“ (engl. “(nonlinear) time series analysis”).²²¹

1.25.09 Als eine Weiterentwicklung der strukturell-funktionalen Systemtheorie T. PARSONS²²², methodisch orientiert an der sog. „operativen Logik“ G. SPENCER-BROWN's²²³, am sog. „Radikalen Konstruktivismus“²²⁴ und am Konzept der sog. „Autopoiesis“ (engl. “Autopoiesis”)²²⁵ nach H.R. MATURANA, Fr.J. VARELA und R. URIBE, entwickelte der Jurist und Soziologe Niklas LUHMANN²²⁶ seit der Mitte der achtziger Jahren des 20. Jhdts. seine sog. „Theorie der sozialen Sy-

219 Grundlegend s. z.B. W. TSCHACHER / G. SCHIEPEK / E.J. BRUNNER: *Self-Organization and Clinical Psychology. Empirical Approaches to Synergetics in Psychology*. Springer. Berlin u.a. 1992 – G. SCHIEPEK / G. STRUNK: *Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater*. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994 – G. SCHIEPEK / W. TSCHACHER (Hrsg.): *Selbstorganisation in Psychologie und Psychiatrie*. Vieweg Verlag. Braunschweig. 1997 – G. SCHIEPEK: *Die Grundlagen der Systemischen Therapie. Theorie – Praxis – Forschung*. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1999 – G. STRUNK / G. SCHIEPEK: *Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens*. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006 – H. HAKEN / G. SCHIEPEK: *Synergetik in der Psychologie. Selbstorganisation verstehen und gestalten*. 2. Aufl. Hogrefe Verlag. Göttingen u.a. 2010. Eingehend s. z.B. G. STRUNK: *Die Selbstorganisationshypothese der Psychotherapie. Systeme. Interdisziplinäre Zeitschrift für systemtheoretisch orientierte Forschung und Praxis in den Humanwissenschaften*. Bd. 12. H. 2. 1998. S. 3-21 – G. STRUNK: *Die Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme – Grundsätzliches – Nutzen – Therapie. Systeme. Interdisziplinäre Zeitschrift für systemtheoretisch orientierte Forschung und Praxis in den Humanwissenschaften*. Bd. 14. H. 2. 2000. S. 185-97 – G. SCHIEPEK: *Die neuronale Selbstorganisation des Selbst. Ein Beitrag zum Verhältnis von neuronalen und mentalen Prozessen aus der Sicht der Synergetik*. In: Fr. RESCH / M. SCHULTE-MARKWORT (Hrsg.): *Kursbuch für integrative Kinder- und Jugendpsychiatrie. Schwerpunkt: Psyche und Soma*. Beltz-PVU. Weinheim. 2006. S. 5-22.

Einführend s. z.B. W. TSCHACHER / G. SCHIEPEK: *Eine methodenorientierte Einführung in die synergetische Psychologie*. G. SCHIEPEK / W. TSCHACHER (Hrsg.): *Selbstorganisation in Psychologie und Psychiatrie*. Vieweg Verlag. Braunschweig. 1997. S. 3-31.

220 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.22.

221 S. z.B. G. SCHIEPEK: *Complexity and Nonlinear Dynamics in Psychotherapy*. *European Review*. Vol. 17. 2009. PP. 331-56.

Einführend s. z.B. W. TSCHACHER: *Zeitreihenanalyse in der systemischen Forschung*. In: M. OCHS / J. SCHWEITZER (Hrsg.): *Handbuch Forschung für Systemiker*. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 2012. S. 299-314.

222 S. z.B. T. PARSONS: *The Social System*. The Free Press. Glencoe/III. 1951 – T. PARSONS: *Social Systems and the Evolution of Action Theory*. The Free Press. New York. 1977. v.a. PP. 48-50.

S. einführend z.B. G. KISS: *Grundzüge und Entwicklung der Luhmannschen Systemtheorie*. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1990. S. 78-82.

223 S. G. SPENCER-BROWN: *The Laws of Form*. Allen and Unwin. London. 1969.

224 S. eingehend z.B. S.J. SCHMIDT: *Der Radikale Konstruktivismus: Ein neues Paradigma im interdisziplinären Diskurs*. In: S.J. SCHMIDT (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1987. S. 11-88.

225 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.05.

226 Zur Person Niklas LUHMANN's siehe die Website <http://www.luhmann-online.de/>.

steme²²⁷, die im Rahmen seiner funktional-strukturellen Methode²²⁸ charakterisiert ist in dem Übergang von der Theorie der systemextern-orientierten (Sozial-)Systeme zur Theorie der selbstreferentiellen, autopoietischen Sozialsysteme, was einhergeht mit einer Reorientierung soziologischer Reflexionen von einer strukturorientierten auf eine prozeßorientierte Perspektive.²²⁹ Indem die Bedeutung von zentralen, generellen sozialnormativen Strukturen mit ihrer Funktion der Vermittlung von gesamtgesellschaftlichen Werten eingeschränkt wird, vertritt demgegenüber N. LUHMANN²³⁰ die Auffassung, daß die ständige Selbstbewegung der systeminternen, konkreten informationellen Kommunikationsprozesse in den dynamischen Sozial(-sub-)systemen die Systemkonstitution angemessener erklärt, was mit einer grundlegenden Umstellung der soziologischen Analyse von sozialer Aktion auf (soziale) Kommunikation verbunden ist.²³¹

227 Grundlegend s. z.B. N. LUHMANN: Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1984.

Eingehend s. z.B. N. LUHMANN: Funktionen und Folgen formaler Organisation. 5. Aufl. Duncker & Humblot. Berlin. (1964) 1999 – N. LUHMANN: Zweckbegriff und Systemrationalität. 5. Aufl. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1968) 1991 – N. LUHMANN: Soziologische Aufklärung. Bd.1. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme. 2. Aufl. Westdeutscher Verlag. Köln, Opladen. 1970 – N. LUHMANN: Die Wissenschaft der Gesellschaft. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1990. Einführend s. z.B. St. JENSEN: Systemtheorie. Verlag. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983 – G. KISS: Grundzüge und Entwicklung der Luhmannschen Systemtheorie. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1990 – G. KNEER / A. NASSEHI: Niklas Luhmanns Theorie sozialer Systeme. Eine Einführung. Wilhelm Fink Verlag. München. 1993 – H. WILLKE: Systemtheorie. 4. Aufl. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Jena. 1993.

Kritisch s. z.B. Kl. KORNWACHS: Nichtklassische Systeme und das Problem der Emergenz. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 202 – O.-P. OBERMEIER: Das Konzept der Selbstorganisation in Niklas Luhmanns späten Entwürfen seiner allgemeinen Gesellschaftstheorie. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 63-76.

228 S. z.B. N. LUHMANN: Funktionale Methode und Systemtheorie. Soziale Welt. Bd. 15. 1964. S. 1-25 (Wiederabgedruckt in: N. LUHMANN: Soziologische Aufklärung. Bd.1. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme. 2. Aufl. Westdeutscher Verlag. Köln, Opladen. 1970. S. 31-53).

229 S. z.B. G. KISS: Grundzüge und Entwicklung der Luhmannschen Systemtheorie. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1990. S. 1-6.

230 S. z.B. N. LUHMANN: Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1984. S. 59-60, 192-93, 193-201, 227, 232-33 – N. LUHMANN: Funktionen und Folgen formaler Organisation. 5. Aufl. Duncker & Humblot. Berlin. (1964) 1999. S. 17-22.

231 S. z.B. G. KISS: Grundzüge und Entwicklung der Luhmannschen Systemtheorie. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1990. S. 2.

2. THEORETISCHE MODELLE DES (NEO-)KONNEKTIONISMUS UND DES SYMBOLISMUS

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden zuerst ein einführender Überblick über die Kognitionstheorie der klassischen Symboltheorie gegeben (Kap. 2.1), und danach über die des sich daran orientierenden (Neo-)Konnektionismus (Kap. 2.2), wie er sich seit etwa der Mitte der achtziger Jahre des 20. Jhdts entwickelt hat, wobei die jeweiligen Grundbegriffe und Grundaussagen in Kürze dargestellt werden einschließlich der damit einhergehenden Methodik, und vor allem das damit verbundene jeweilige Repräsentationsformat mit den entsprechenden Modellkonzeptionen besonders eingehend dargestellt werden wird.

2.1 KONZEPTION DER KLASSISCHEN SYMBOLTHEORIE²³²

Die klassische Symboltheorie wird nun in Grundzügen kurz dargestellt:

2.11 SYMBOLISCHE METHODE: SYMBOLISCHE INFORMATIONSVERARBEITUNG AUF DER BASIS VON SYMBOLEN UND SYMBOLSTRUKTUREN

Die Klassische Symbol(-verarbeitungs-)theorie (engl. "classical symbol-processing theory")²³³, der sog. „Symbolismus“ (engl. "symbolism"), betrachtet die symbolische Informationsverarbeitung, oder kurz: Symbolverarbeitung (engl. "symbol processing")²³⁴, als den angemessenen Erklärungsansatz für Kognition und Intelligenz, d.h. die strikt-formale, serielle und universale Manipulation bzw. Transformation von vorgegebenen Symbolen – Zeichen eines streng definierten Alphabets – in andere, entsprechend einem vorgegebenen eindeutigen und endlichen Berechnungsverfahren, bestehend aus einer Menge von Berechnungsvorschriften bzw. von Axiomen (sog. „Algorithmus“ (engl. "algorithm")²³⁵), m.a.W. sowohl der Mensch wie auch der Computer wird also als ein

232 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des gleichnamigen Kapitels 2. in meiner Magisterarbeit: H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

233 Eine Einführung hierzu bieten z.B. R.L. LEWIS: Cognitive Modeling, Symbolic. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 141-43 – M.L. ANDERSON / D.R. PERLIS: Symbol Systems. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 281-87 – G. STRUBE: Kognition. In: G. STRUBE (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 305-10 – R. SUN: Artificial Intelligence. Connectionist and Symbolic Approaches. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Vol. 2. Pergamon/Elsevier Science. Oxford. 2001. PP. 783-89 – M.G. DYER: Connectionism versus Symbolism in High-Level Cognition. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 382-416 – W. KOLLMANN / R. PFAU: Dem Symbol ins Netz gegangen: Konnektionismus versus Symbolismus. Frankfurter Linguistische Forschungen. Bd. 14. 1993. S. 1-13.

S. auch K.B. KORB: Symbolism and Connectionism. AI Back at a Join Point. Proceedings of the Conference on Information, Statistics and Induction in Science (ISIS'96). World Scientific. Singapore. 1996. PP. 247-57.

Die Klassische Symboltheorie in ihrer Verbindung zur klassischen Künstlichen Intelligenz (KI) (engl. "Artificial Intelligence (AI)"), von J. HAUGELAND: Artificial Intelligence: The Very Idea. 7. Aufl. The MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1985. PP. 112-17 auch als "Good Old Fashioned AI (GOFAI)" bezeichnet, wird z.B. in K.B. KORB: Symbolism and Connectionism. AI Back at a Join Point. Proceedings of the Conference on Information, Statistics and Induction in Science (ISIS'96). World Scientific. Singapore. 1996. PP. 247-57, G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G.Teubner. Stuttgart. 1991. S. 2-9 und in M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 75-89 ausgeführt.

234 S. z.B. G. STRUBE: Symbolverarbeitung. In: G. STRUBE (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 708.

235 S. Kap. 1.11, Fn. 12.

seriell organisiertes „Informationsverarbeitungs-System“ (engl. „information processing system“)²³⁶ betrachtet (sog. „Komputationale“²³⁷ Theorie des Geistes“ (engl. „Computational Theory of Mind“)²³⁸): Die diskreten (Elementar-)Symbole bzw. die komplexen Symbolstrukturen, als Relationen zwischen Symbolen, können Sachen oder Sachverhalte der Wirklichkeit bezeichnen, und zwar derart, daß das System bei gegebenen Symbol(-struktur-)en die Sachen oder Sachverhalte beeinflussen oder von ihnen beeinflusst werden kann. Diese Symbole bzw. Symbolstrukturen dienen demnach als interne mentale Repräsentation der äußeren Umgebung, an die sich ein sog. „Symbolsystem“ (engl. „symbol system“)²³⁹ anzupassen versucht.

Man kann nun ein symbolorientiertes Minimalmodell erstellen, u.z. entweder auf der Basis der sog. „Logischen Form“ (engl. „logical form“) im Sinne der Logiker, Mathematiker und Philosophen Gottlob FREGE, Bertrand RUSSELL und Ludwig WITTGENSTEIN anhand der sog. „(atomaren) Prädikation“ und der sog. „(2-stelligen) Relation“²⁴⁰:

236 S. A. NEWELL / H. SIMON: Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. PP. 113-26 (dt.: Computerwissenschaft als empirische Forschung. Symbole und Lösungssuche. In: D. MÜNCH (Hrsg.): Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1992. S. 54-91, v.a. 60-61) – H.A. SIMON / A. NEWELL: Information Processing in Computer and Man. The American Scientist. Vol. 52. 1964. PP. 281-300 (dt.: Informationsverarbeitung in Computer und Mensch. In: W.C. ZIMMERLI / S. WOLF (Hrsg.): Künstliche Intelligenz. Philosophische Probleme. Philipp Reclam jun. Stuttgart. 1994. S. 112-45, v.a. S. 128-34).

237 Der Begriff „komputational“ (engl. „computational“) wird hier im Sinne von „berechnend“, „eine Berechnung betreffend“, „Berechnungs-(...)“ gebraucht.

238 Die Standarddefinition der Berechnung bzw. der Berechenbarkeit (engl. „computability“) wird nach h.M. in der typischen Operationalität einer sog. „TURING-Maschine“ (engl. „Turing machine“) gesehen, benannt nach dem britischen Logiker, Mathematiker und Kryptoanalytiker Alan M. TURING.

S. hierzu grundlegend z.B. A.M. TURING: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society. Vol. 2. No. 42. 1936. PP. 230-65 – A.M. TURING: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem: A Correction. Proceedings of the London Mathematical Society. Vol. 2. No. 43. 1938. PP. 544-46 – Br.J. COPELAND (Ed.): The Essential Turing: Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life plus The Secrets of Enigma. Clarendon Press. Oxford University Press. Oxford. 2004.

S. hierzu einführend z.B. K. ERK / L. PRIESE: Theoretische Informatik. Eine umfassende Einführung. 3. Aufl. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg. (2000) 2008. S. 165-93, 227-472 – U. SCHÖNING: Theoretische Informatik – kurzgefaßt. 4. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. (1992) 2003. S. 91-150 – J.E. HOPCROFT / R.D. ULLMAN: Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. Addison-Wesley. Boston, Munich u.a. 1979 (dt.: Einführung in die Automatentheorie, Formale Sprachen und Komplexitätstheorie. 4. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 157-89, 191-235).

S. auch Kl. MAINZER: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis. Paderborn. 2010. S. 151-55.

Siehe auch Fn. 247.

239 Eingehend zum Begriff des sog. „Symbolsystems“ (engl. „symbol system“) s. z.B. A. NEWELL: Physical Symbol Systems. Cognitive Science. Vol. 4. 1980. PP. 135-83, v.a. PP. 142-69.

240 S. hierzu grundlegend z.B. G. FREGE: Begriffsschrift: eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens. Halle. 1879. In: I. ANGELELLI (Hrsg.): G. Frege: Begriffsschrift und andere Aufsätze. 2. Aufl. Wiss. Buchgesellschaft. Darmstadt. 1964. S. VII-88 – G. FREGE: Funktion und Begriff. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische

$F(a)$ bzw. $R(a, b)$ (15)

oder, dementsprechend, auf der Basis der sog. „Linguistischen Form“ (engl. “linguistic form”) im Sinne des U.S.-amerikanischen Linguisten Noam CHOMSKY im Rahmen seiner sog. „Generativen (Phrasenstruktur-)Grammatik“ (engl. “generative (phrase structure) grammar”)²⁴¹:

$[S[NP][VP]]$ bzw. $[S[NP][VP[VNP]]]$ (16)

2.12 LOKALE (SYMBOL-)REPRÄSENTATION

Ein solches Symbolsystem enthält dabei zu jedem Zeitpunkt eine Ansammlung dieser Symbolstrukturen, die aus einer Anzahl von Vorkommnissen oder Instanzen (engl. “token”) einzelner Symbole zusammengesetzt sind²⁴², die sich wiederum in einer lokalen physikalischen Relation zueinander befinden, d.h. ein Zeichenvorkommnis befindet sich neben einem anderen, sodaß man die Definition eines Symbols wie folgt festlegen kann: Ein Symbol ist eine eindeutig identifizierbare und lokalisierbare Einheit, und es übernimmt die Rolle eines Stellvertreters oder Platzhalters für einen bestimmten Gegenstand der Wirklichkeit.²⁴³

Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. 1994. S. 18-39 – G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. 1994. S. 40-65 – G. FREGE: Über Begriff und Gegenstand. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. 1994. S. 66-80 – A.N. WHITEHEAD / B. RUSSELL: Principia Mathematica. Vol. 1-3. 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge. (1910-13) 1927 – B. RUSSELL: The Philosophy of Logical Atomism. Open Court, LaSalle. 1918/19. In: J.G. SLATER (Ed.): Bertrand Russell. The Philosophy of Logical Atomism and other Essays. The Collected Papers. Vol. 8. 1914-19, 1986. PP. 157-244 – L. WITTGENSTEIN: Tractatus logico-philosophicus. In: Ludwig Wittgenstein. Werkausgabe. Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus. Tagebücher 1914-16. Philosophische Untersuchungen. 7. Aufl. Suhrkamp Verlag, Berlin (1921) 1990. S. 7-85 – L. WITTGENSTEIN: Some Remarks on Logical Form. Aristotelian Society Supplementary. Vol. 9. Knowledge, Experience and Realism. 1929. PP. 162-71 (Reprinted in: J.C. KLAGGE / A. NORDMANN (Eds.): Ludwig Wittgenstein. Philosophical Occasions 1912-51. Hackett Publishing Company, Indianapolis. 1993. PP. 29-35).

S. einführend z.B. A. BECKERMANN: Einführung in die Logik. Walter de Gruyter, Berlin, New York. 1997. S. 172 – Th.G. BUCHER: Einführung in die angewandte Logik. Zweite, erweiterte Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York. 1998. S. 249-50 – P. HOYNINGEN-HUENE: Formale Logik. Eine philosophische Einführung. Philipp Reclam jun. Stuttgart. 1998. S. 23-27.

241 Grundlegend s. N. CHOMSKY: Syntactic Structures. Mouton, The Hague/Paris. 1957.

S. einführend z.B. Chr. DÜRSCHIED: Syntax. Grundlagen und Theorien. Westdeutscher Verl. Wiesbaden. 3. Aufl. 2005. S. 131-34 – H. PELZ: Linguistik. Eine Einführung. 7. Aufl. Hoffmann und Campe, Hamburg. 2002. S. 153-58.

242 S. H.A. SIMON / A. NEWELL: Information Processing in Computer and Man. The American Scientist. Vol. 52. 1964. P. 291 sprechen auch von sog. “symbol occurrences”.

243 S. z.B. A. NEWELL / H. SIMON: Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. PP. 113-26 (dt.: Computerwissenschaft als empirische Forschung. Symbole und Lösungssuche. In: D. MÜNCH (Hrsg.): Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven. Suhrkamp, Frankfurt am Main. 1992. S. 60).

Zur Symboldefinition s. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionis-

2.13 SYMBOLISCHE PRODUKTIONSSYSTEME

2.131 Neben diesen Symbolstrukturen enthält ein Symbolsystem eine Anzahl von sog. „(Produktions-)Regeln“ (engl. “(production) rules”)²⁴⁴, weshalb man auch von einem sog. „Produktions(-regel-)system“ (engl. “production (rule) system”)²⁴⁵ spricht. Die Interpretation der Symbolstrukturen bedeutet dementsprechend, daß das Symbolsystem bei Vorgabe einer Symbolstruktur die entsprechenden syntaktischen Produktions- und Transformationsprozesse bzw. -regeln, die Symbole erzeugen, umwandeln oder entfernen können, auszuführen imstande ist. Die Symbolstrukturen können dabei von inneren Zuständen des Systems, d.h. anderen Symbolstrukturen, oder von äußeren Zuständen, d.h. den Zuständen realer Objekte, verändert werden oder diese verändern.

2.132 Demnach ergibt sich die Definition eines sog. „physikalischen Symbolsystems“ (engl. “physical symbol system”) wie folgt: “A physical symbol system is a machine that produces through time an evolving collection of symbol structures.”²⁴⁶ Die Symbolverarbeitungstheorie geht unter Berufung auf die U.S.-amerikanischen kognitiven Psychologen und Computerwissenschaftler Allen

mus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag, München/Mering. 2001. S. 82 – T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. P. 236 spricht hier von “strictly local”.

Zur Differenzierung in die verschiedenen Repräsentationstypen “strictly” bzw. “ultra local”, “(fully) local”, “semi-local” bzw. “distributed” und “fully distributed” wird auf die Ausführungen in Kap. 2.222.1-2.222.4 verwiesen.

244 Unter einer sog. „(Produktions-)Regel“, auch Produktion (engl. “production”) genannt, versteht man in der Theorie der formalen Sprachen, z.B. bei der Definition einer sog. „Grammatik“ einer formalen Sprache, eine (Umformungs-)Regel, die festlegt, wie man aus einem bereits bekannten Konstrukt, z.B. einem Wort, eine Kombination von neuen Konstrukten erzeugen kann, indem die linke Regelseite durch die rechte ersetzt wird. Diese Produktionen sind dabei grundsätzlich Regeln der Form: Wenn die Bedingungen A_1, \dots, A_n (sog. „Prämissen“) erfüllt sind, dann führe die Aktion B (sog. „Konklusion“) aus (sog. „materiale Implikation“).

S. hierzu im einzelnen z.B. K. ERK / L. PRIESE: Theoretische Informatik. Eine umfassende Einführung. 3. Aufl. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. (2000) 2008. S. 53-56 – U. SCHÖNING: Theoretische Informatik – kurzgefaßt. 4. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin. (1992) 2003. S. 13-17.

245 Einführend s. z.B. H.A. SIMON: Production Systems. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 676-78 – Kl. OPWIS / G. LÜER: Modelle der Repräsentation von Wissen. In: N. BIRBAUMER et al. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Ser. 2: Kognition. Bd. 4: Gedächtnis. Hogrefe. Göttingen u.a. 1996. S. 382-89, 389-97 – G. JONES / Fr.E. RITTER: Production Systems and Rule-Based Inference. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 741 geben folgende Definition an: “Production systems are computer programs that reason using production rules.”

S. auch D. WALLACH: Komplexe Regelungsprozesse. Eine kognitionswissenschaftliche Analyse. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden. 1998. S. 72-82.

246 S. z.B. A. NEWELL / H. SIMON: Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. PP. 113-26, v.a. P. 116 (dt.: Computerwissenschaft als empirische Forschung. Symbole und Lösungssuche. In: D. MÜNCH (Hrsg.): Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven. Suhrkamp, Frankfurt am Main. 1992. S. 60).

NEWELL und Herbert A. SIMON von der begründeten Vermutung aus, daß sich jedes intelligente Handeln und Verhalten in einem physikalischen Symbolsystem manifestiert, d.h. Symbolverarbeitungssysteme sind dementsprechend immer physikalische Symbolsysteme, womit gemeint ist, daß das gesamte Symbolsystem eindeutig und ausschließlich den Gesetzen der Physik gehorcht (sog. "Physical Symbol System Hypothesis (PSSH)"²⁴⁷): Das symbolische Informationsverarbeitungssystem ist also letztlich ein rein physikalisches und wird definiert als ein System, das die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für intelligentes Verhalten und Handeln besitzt, d.h., "[i]t specifies a general class of systems within which one will find those capable of intelligent action."²⁴⁸ Jedes physikalische Symbolsystem, bestehend aus physikalisch realisierten Symbolen und Symbolstrukturen, ist daher ein intelligentes System, sodaß die Symbolsystem-Hypothese impliziert, "that intelligence will be realized by a universal computer."²⁴⁹

2.14 POSITIVE MOTIVE FÜR DEN SYMBOLISMUS: STANDARDARGUMENT NACH J.A. FODOR UND Z.W. PYLYSHYN

Die generelle Struktur der Standardargumentation des U.S.-amerikanischen Philosophen Jerry A. FODOR und des kanadischen Philosophen Zenon W. PYLYSHYN²⁵⁰, wonach das klassische symbolorientierte Modell charakterisiert ist durch (1) eine sog. „kombinatorische Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen“ (engl. "combinatorial syntax and semantics for mental representations")²⁵¹ und (2) durch mentale Operationen im Sinne von „struktursensi-

247 S. A. NEWELL / H. SIMON: *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. P. 116: "*The Physical Symbol System Hypothesis*. A physical symbol system has the necessary and sufficient means for general intelligent action."

Ebenso s. z.B. A. NEWELL: *Physical Symbol Systems*. *Cognitive Science*. Vol. 4. 1980. PP. 135-83, v.a. PP. 169-72.

S. auch M.L. ANDERSON / D.R. PERLIS: *Symbol Systems*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 281-87.

Nach G. STRUBE: *Kognition*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 306-307 diskutieren A. NEWELL und H. SIMON damit die Bedingungen der Möglichkeit von (künstlicher) Intelligenz i.S.v. Kognition.

248 S. A. NEWELL / H. SIMON: *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. P. 116.

249 S. A. NEWELL / H. SIMON: *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*. Communications of the Association for Computing Machinery. Vol. 19. 1976. P. 117.

S. auch die Ausführungen in Fn. 238.

250 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: *Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis*. *Cognition*. Vol. 28. 1988. PP. 3-71, v.a. PP. 12-13, 33-50.

251 Nach J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: *Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis*. *Cognition*. Vol. 28. 1988. PP. 12-13 hat man eine kombinatorische Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen zu postulieren, da sonst bestimmte Eigenschaften von propositionalen Einstellungen (engl. "propositional attitudes") nicht erklärbar wären, und definieren sie wie folgt:

(1.1) "(...) there is a distinction between structurally atomic and structurally molecular representations;"

(1.2) "(...) structurally molecular representations have syntactic constituents that are themselves

tiven Prozessen“ (engl. “structure sensitivity of processes”)^{252,253}, läßt sich im einzelnen wie folgt darlegen²⁵⁴: Wie bereits der U.S.-amerikanische Linguist Noam CHOMSKY²⁵⁵ im Rahmen seiner sog. „Generativen (Phrasenstruktur-)Grammatik“ (engl. “generative (phrase structure) grammar”)²⁵⁶ formuliert hat, kann man nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN²⁵⁷, basierend auf dem Fundamentalprinzip der sog. „(syntaktischen und semantischen) Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen“ (engl. „constituent structure of mental representations“)²⁵⁸, die folgenden eng miteinander verbundenen Eigenschaf-

either structurally molecular or structurally atomic;”

Die ersten beiden Bedingungen bezeichnen sie zumeist als die Forderung nach einer (syntaktischen) Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen.

(1.3) “(...) the semantic content of a (molecular) representation is a function of the semantic contents of its syntactic parts, together with its constituent structure.”

Die dritte Bedingung bezeichnen die Autoren zumeist als die Forderung nach einer kompositionalen Semantik.

252 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 13.

Das klassische kognitionswissenschaftliche Konzept eines struktursensitiven Prozesses stellt die Schlußfolgerung dar, die sog. „logische Inferenz“ (engl. “logical inference”).

253 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis.

Cognition. Vol. 28. 1988. P. 13 betrachten (1) und (2) als die Anforderungen, die ein klassisches Kognitionsmodell definiert, d.h. sie beschränken (engl. “constrain”) die physikalischen Realisationen von Symbolstrukturen im Sinne eines physikalischen Symbolsystems nach A. NEWELL.

S. hierzu die Ausführungen in Kap. 2.132.

254 Eine sehr gute Zusammenfassung, der in dieser Darlegung im wesentlichen gefolgt wird, findet sich bei Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 76-77.

S. auch W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 210-17 – J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 199-203.

255 S. z.B. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 33 Fn. 22 mit Hinweis auf N. CHOMSKY: Aspects of the Theory of Syntax. MIT Press. Cambridge/MA. 1965 und N. CHOMSKY: Language and Mind. Harcourt, Brace and World. New York. 1968.

S. auch G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Kognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 58 mit Hinweis auf N. CHOMSKY: Verbal Behavior. Language. Vol. 35. 1959. PP. 26-58.

256 S. hierzu die Ausführungen in Kap. 2.11 Fn. 241.

257 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 33.

258 S. Fn. 251.

Unter einer sog. „Konstituente“ (engl. “constituent”) versteht man dabei in der Linguistik diejenigen (Satz-)Bestandteile, in die sich eine syntaktische (De-)Konstruktion sinnvoll zerlegen läßt, d.h. die in seiner Gesamtheit untereinander ersetzbar (Substitutionstest), umstellbar (Permutationstest), wegläßbar (Deletionstest) und zusammenstellbar (Koordinationstest) sind, sodaß sich z.B. ein Satz nicht unmittelbar in Wörter zerlegen läßt, sondern zunächst in Wortgruppen, in die sog. „Phrasen“ (engl. “phrases”), die somit die Konstituenten darstellen.

S. hierzu z.B. G. GREWENDORF / Fr. HAMM / W. STERNEFELD: Sprachliches Wissen. Eine Einführung in moderne Theorien der grammatischen Beschreibung. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1993. S. 156-65 – J. MEIBAUER: Einführung in die germanistische Linguistik. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verl. Stuttgart u.a. 2002. S. 125-28 – H. VATER: Einführung in die

ten der menschlichen Kognition erklären: ihre Produktivität, Systematizität, Kompositionalität und ihre inferentielle Systematizität, weshalb diese vier zentralen Konzepte nun kurz erläutert werden.

2.141 PRODUKTIVITÄT DER MENTALEN REPRÄSENTATIONEN

Das Produktivitätsargument wird nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN²⁵⁹ anhand der Sprachfähigkeit des Menschen belegt: Die mentalen und linguistischen Repräsentationen sind produktiv (engl. "productive"), d.h. ein kompetenter Sprecher einer natürlichen Sprache kann potentiell aus einer begrenzten Anzahl von einfachen Spracheinheiten eine unbegrenzte Anzahl von verschiedenen Sprachäußerungen und Satzausdrücken erzeugen, m.a.W. „produzieren“ (engl. "produce") oder „generieren“ (engl. "generate"), und er kann demnach auch eine unbegrenzte Anzahl von verschiedenen Gedanken, sog. „Propositionen“ (engl. "propositions")²⁶⁰ hervorbringen und verstehen.²⁶¹ Dies ist aber nur möglich, wenn man dem Sprecher die Kompetenz einer internen syntaktischen Konstituentenstruktur zur generativen Produktion von komplexen mentalen Repräsentationen, den Symbolstrukturen, zuschreibt.

2.142 SYSTEMATIZITÄT VON MENTALEN REPRÄSENTATIONEN

Das Systematizitätsargument wird nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN²⁶² ebenfalls durch die Spracherzeugung und das Sprachverständnis des Menschen belegt: Die mentalen und linguistischen Repräsentationen sind systematisch (engl. "systematic"), d.h., „daß die Fähigkeit, manche Sätze zu er-

Sprachwissenschaft. 4. Aufl. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 107-13 – W. O'GRADY: Syntax: The Analysis of Sentence Structure. In: W. O'GRADY / M. DOBRO-VOLSKY / Fr. KATAMBA: Contemporary Linguistics. An Introduction. 3rd Ed. Addison Wesley Longman. Harlow u.a. 1997. PP. 193-94.
259 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 33-37, v.a. P. 33.

S. auch Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 76 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 212 – G. HELM: Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1991. S. 115.

260 Zum Begriff der „Proposition“ (engl. "proposition") und der „propositionellen Einstellung“ (engl. "propositional attitude") wird auf die Ausführungen in Kap. 2.145, Fn. 283, 284 verwiesen.

261 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 33, 44, die davon ausgehen, daß man einen Gedanken nur denken kann, der durch eine interne mentale Repräsentation ausgedrückt werden kann.

262 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 37-41.

S. auch Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 76 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 212.

zeugen bzw. zu verstehen intrinsisch (engl. "intrinsically") mit der Fähigkeit verknüpft ist, bestimmte andere Sätze zu erzeugen bzw. zu verstehen"²⁶³, d.b., falls ein kompetenter Sprecher zum Beispiel den Satz 'John loves Mary' versteht, versteht er auch zwangsläufig den inhaltlich verwandten Satz 'Mary loves John', weshalb man einen generativen Mechanismus zu postulieren hat, der den Sprecher dazu befähigt, die gleiche syntaktische Konstituentenstruktur <erste Individuenkonstante × Relator × zweite Individuenkonstante> in den beiden Beispielsätzen zu erkennen, m.a.W. er könnte die komplexe Symbolstruktur aRb bzw. bRa im Sinne der formalen Prädikatenlogik mittels einer struktursensitiven (Vertauschungs-)Operation der Konstituenten a und b erzeugen.²⁶⁴

2.143 SEMANTISCHE KOMPOSITIONALITÄT VON MENTALEN REPRÄSENTATIONEN

Nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN²⁶⁵ behandelt das semantische Kompositionalitätsargument die semantische Systematizität²⁶⁶, d.h. unter der Voraussetzung der syntaktischen Konstituentenstruktur eines Satzes²⁶⁷ läßt sich die Bedeutung einer komplexen mentalen Repräsentation als eine Funktion des semantischen Gehalts ihrer lexikalischen Elemente und der syntaktischen Struktur ihrer Konstituenten auf der Grundlage der entsprechenden Operationen „berechnen“, wobei die Syntax die Semantik „spiegelt“ (engl. "mirror")²⁶⁸, d.b. „die kausalen Beziehungen, die zwischen Symbolen aufgrund

263 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 37.

264 Im Text wird hier der Notation in J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 40, 41, 44 gefolgt. Gemäß der üblichen Notation in der Logik wäre $R(a,b)$ bzw. $R(b,a)$ zu schreiben.

265 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 41-46 – J.A. FODOR: Psychosemantics. MIT Press. Cambridge/MA. 1987. PP. 147-54.

S. auch Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 76-77.

Einführend s. z.B. P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality. In: Kl. von HEUSINGER / Cl. MAIENBORN / P. PORTNER (Eds.): Semantics. An International Handbook of Natural Language Meaning. Mouton de Gruyter. Berlin. 2008. PP. 109-10 – P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality I. Definitions and Variants. Philosophy Compass. Vol. 5. 2010. PP. 250-64, v.a. P. 254.

266 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 77.

267 Nach J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 43-44 setzt das Prinzip der (semantischen) Kompositionalität eine (syntaktische) Konstituentenstruktur von Sätzen voraus.

S. hierzu die Ausführungen in Fn. 251.

268 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 43-44.

S. auch Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993.

ihrer formalen bzw. syntaktischen Eigenschaften bestehen, sind isomorph zu den semantischen bzw. inferentiellen Beziehungen zwischen den durch die Symbole ausgedrückten Bedeutungen.²⁶⁹ M.a.W. die Übereinstimmung in Bezug auf die Konstituentenstruktur garantiert nur dann eine adäquate semantische Interpretation i.S.d. sog. „semantischen Kohärenz“ (engl. „semantic coherence“), „wenn der Beitrag zur Gesamtbedeutung eines Ausdrucks kompositional, d.h. strukturabhängig berechnet wird“²⁷⁰, weshalb eine komplexe mentale Repräsentation auch auf Grund ihrer semantischen Struktur in einer systematischen Relation zu anderen mentalen Repräsentationen steht. Die Annahme einer syntaktischen Konstituentenstruktur erklärt die semantische Systematizität allerdings nur dann, wenn die Bedeutungen der Konstituenten einer komplexen Symbolstruktur kontextunabhängig sind (sog. „Prinzip der Kompositionalität“ (engl. „principle of compositionality“))²⁷¹, denn „würde die Bedeutung von Konstituenten in Abhängigkeit vom Kontext des Ausdrucks variieren, in den sie eingebettet sind, wäre schwer zu verstehen, wie die semantische Kompositionalität der mentalen Repräsentationen möglich

-
- S. 76 – G. STRUBE / Chr. HABEL / L. KONIECZNY / B. HEMFORTH: Kognition. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 58.
- 269 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang, Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 76 mit Bezug auf J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 28: "The Classical treatment of mental processes rests on two ideas. (...) The first idea is that it is possible to construct languages in which certain features of the syntactic structures of formulas correspond systematically to certain of their semantic features."
- S. auch Z.W. PYLYSHYN: Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1984. P. 74: "A computational process is one whose behaviour is viewed as depending on the representational or semantic content of its states. This occurs by virtue of there being another level of structure – variously called the 'symbol level' or the syntax or logical form – which possesses the following two essential properties. (...) Two, the formal symbol structures mirror all relevant semantic distinctions to which the system is supposed to respond and continue to do so when certain semantically interpreted rules are applied to them, transforming them into new symbol structures."
- S. ebenso Z.W. PYLYSHYN: Computation and Cognition: Issues in the Foundations of Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 3. No. 1. 1980. P. 114.
- 270 S. J. KELLER: Konnektionismus – ein neues Paradigma zur Wissensrepräsentation? Linguistische Berichte. Bd. 128. 1990. S. 316.
- 271 Nach J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 42 muß ein lexikalisches Element in jedem Kontext, in dem es eingebunden ist, annähernd den gleichen semantischen Beitrag leisten, d.h. man benötigt semantisch individuierte und stabile atomare mentale Repräsentationen.
- Das Kompositionalitätsprinzip wird nach A. LINKE / M. NUSSBAUMER / P.R. PORTMANN: Studienbuch Linguistik. 4. Aufl. Max Niemeyer Verl. Tübingen. 2001. S. 139 auch das sog. „FREGE-Prinzip“ (engl. "FREGE's Principle") genannt.
- Zum Kompositionalitätsprinzip s. z.B. G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1994. S. 40-65, v.a. S. 46-47, 49 – G. FREGE: Logische Untersuchungen. Dritter Teil: Gedankengefüge. Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus. Hf. 3. 1923-26. S. 36-51 (wiederabgedruckt in G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966. S. 72-91, v.a. S. 72.

ist.“²⁷²

2.144 SYSTEMATIZITÄT DER INFERENZ UND INFERENTIELLE HOMOGENITÄT

Das Argument der inferentiellen Systematizität (engl. "systematicity of inference") besagt nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN²⁷³, daß nur unter der Annahme des Begriffs einer logischen Syntax, den die klassische Symboltheorie fordert, die Übereinstimmung von logischen und psychologischen Gesetzen erklärt werden könne, denn, nur wenn die „logisch homogene Klasse von Schlußfolgerungen durch eine entsprechend homogene Klasse psychologischer Mechanismen ausgeführt wird“²⁷⁴, wird erklärbar, warum die kognitive Fähigkeit, bestimmte logische Schlüsse zu ziehen, keine Lücken (engl. "gaps")²⁷⁵ aufweist, sodaß jemand, der den Schluß von $P \wedge Q \wedge R$ auf P ziehen kann, nicht den Schluß von $P \wedge Q$ auf P ziehen könnte. Da die Autoren aber von dieser inferentiellen Homogenität ausgehen²⁷⁶, entspricht dem logischen Gesetz, daß von einer Konjunktion auf die jeweiligen Konjunktionskomponenten geschlossen werden kann, das psychologische Gesetz, daß die mentale Repräsentation $P \wedge Q$ aus den Konstituenten P , Q und dem logischen Partikel \wedge besteht, weshalb die Systematizität des logischen Schlusses erklärt wäre.

Abschließend halten die Autoren fest, daß, sofern man also eine Theorie der strukturierten Repräsentation annimmt, man gezwungen ist, Repräsentationen mit einer ähnlichen oder identischen Struktur anzunehmen, entweder, im linguistischen Fall, die syntaktische Form, oder, im inferentiellen Fall, die logische Form, und, sofern man struktursensitive mentale Prozesse annimmt, wird diese Theorie dann voraussagen, daß ähnlich strukturierte Repräsentationen im allgemeinen ähnliche Rollen im Denken spielen werden.²⁷⁷

272 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 77.

273 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 46-48.

S. auch W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 212.

Es wird auch der Begriff der sog. „inferentiellen Kohärenz“ (engl. "coherence of inference") verwendet. S. z.B. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 212 – J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. P. 15.

274 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 47.

275 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 48: "But, we claim, you don't find cognitive capacities that have these sorts of gaps."

276 S. Fn. 273.

277 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 48.

2.145 REPRESENTATIONAL THEORY OF MIND UND LANGUAGE OF THOUGHT IM SINNE VON J.A. FODOR

Diese Fundamentalthesen des Symbolischen Paradigmas münden somit in die Kernthese der sprachlichen Struktur der mentalen Repräsentationen, d.h. die Fähigkeit, eine „äußere“ Sprache in produktiver und systematischer Weise zu verwenden, wird nach J.A. FODOR damit erklärt, daß der Mensch über eine „innere“ sog. „Sprache des Denkens“²⁷⁸ (engl. “Language of Thought (LOT)”) ²⁷⁹ mit rekursiver und kombinatorischer Syntax und Semantik auf der Basis von internen mentalen Repräsentationen (engl. “mental representation”) ²⁸⁰ verfügt (sog. „Repräsentationale Theorie des Geistes“ (engl. “Representational Theory of Mind (RThM)”) ²⁸¹, sodaß Denken und Schlußfolgern auf der Manipulation von syntaktisch strukturierten Symbolen in der Sprache des Denkens beruht, wobei diese Symboltransformationen aufgrund der eindeutigen Interpretation der Symbole und Symbolstrukturen und damit alle durch das physikalische Symbolsystem auszuführenden Aufgaben jederzeit (vollständig) beschreibbar sind (sog. „symbolische“ bzw. „semantische Transpa-

278 Häufiger ist die – nicht ganz wörtliche – deutsche Übersetzung „Sprache des Geistes“.

S. z.B. M. KURTHEN: Neurosemantik. Grundlagen einer Praxiologischen Kognitiven Neurowissenschaft. F. Enke Verlag. Stuttgart. 1992. S. 65.

279 S. J.A. FODOR: The Language of Thought. Crowell. New York 1975 – J.A. FODOR: The Language of Thought. Harvester Press. Sussex. 1976. PP. 75-79, 198-99 – J.A. FODOR: LOT 2: The Language of Thought Revisited. Oxford University Press. New York. 2008.

Einführend zur LOT-Hypothese s. z.B. G. REY: Language of Thought. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 753-60.

S. hierzu z.B. K. STERELNY: The Representational Theory of Mind. An Introduction. Basil Blackwell. Oxford. 1990. PP. 23-28.

280 Die Minimaldefinition des Begriffs der mentalen Repräsentation (engl. “mental representation (*mentRep*) besteht in einer dreistelligen Relation $R_{mentRep}(Syst, Z_{Real}, Z_{Syst})$, u.z. zwischen einem individuellen informationsverarbeitenden System (Syst), dem zu repräsentierenden Repräsentandum (Z_{Real}) i.S. eines Aspekts des gegenwärtigen Zustands der Realität und dem repräsentierten Repräsentat (Z_{Syst}) i.S. eines funktional individuierten, internen Systemzustands des Systems.

281 Die Grundzüge seiner Position wurde bereits in den Kapiteln 2.1 und 2.141-2.144 dargelegt. Im einzelnen s. z.B. J.A. FODOR: The Language of Thought. Harvester Press. Sussex. 1976. PP. 75-79, 198-99 – J.A. FODOR: Three Cheers for Propositional Attitudes. In: J.A. FODOR: Representations. MIT Press. Cambridge/MA. 1981. PP. 120-21 – J.A. FODOR: Propositional Attitudes. In: J.A. FODOR: Representations. MIT Press. Cambridge/MA. 1981. PP. 177-203 – J.A. FODOR: The Modularity of Mind. MIT Press. Cambridge/MA. 1983. PP. 39-40 – J.A. FODOR: Psychosemantics. MIT Press. Cambridge/MA. 1987. PP. 16-26, v.a. PP. 16-17: “(...) RTM is the conjunction of the following two claims:

Claim 1 (the nature of propositional attitudes):

For any organism *O*, and any attitude *A* toward the proposition *P*, there is a (‘computational’/ ‘functional’) relation *R* and a mental representation *MP* such that *MP* means that *P*, and *O* has *A* iff *O* bears *R* to *MP*. (...)

Claim 2 (the nature of mental processes):

Mental processes are causal sequences of tokenings of mental representations.”

S. hierzu z.B. K. STERELNY: The Representational Theory of Mind. An Introduction. Basil Blackwell. Oxford. 1990. PP. 19-23.

Zur sog. „Repräsentationalen Theorie des Geistes“ (engl. “Representational Theory of Mind (RThM)”) s. auch die Ausführungen in Kap. 4.211, 6.20, 6.422.

renz“ (engl. “symbolic (semantic) transparency”²⁸²), sodaß diese Eigenschaften als entscheidende Vorzüge der symbolorientierten Kognitionstheorie aufgefaßt werden kann.

Eine Person hat nach J.A. FODOR demnach eine bestimmte sog. „propositionale Einstellung“ (engl. “propositional attitude”)²⁸³, z.B. eine Überzeugung, wenn sie eine interne mentale Repräsentation im Sinne einer sog. „(logischen) Proposition“ (engl. “proposition”)²⁸⁴ gebildet hat, die einen bestimmten Inhalt besitzt, und die Person in einer bestimmten intentionalen Relation zu dieser Repräsentation steht, d.h. diese Repräsentation eine bestimmte funktionale Position im formalen Berechnungs- bzw. Ableitungsprozeß der „Sprache des Geistes“ einnimmt.

2.15 KRITIK AM SYMBOLISMUS

Im Rahmen der sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. “symbolism vs. connectionism debate”)²⁸⁵ ist in der Literatur²⁸⁶ vielfach heftige generelle Kritik von den Konnektionisten am Symbolismus bzw. an den Modellen der klassischen Künstlichen Intelligenz geübt worden²⁸⁷, weshalb an dieser Stelle zumindest in Kürze die wichtigsten Argumente erwähnt werden:

1. die Beschränkung auf explizite, logisch bzw. linguistisch zu formalisierende Symbolverarbeitungsaufgaben auf der Grundlage von propositionalen Repräsentationen und die gleichzeitige Vernachlässigung von kognitiven (Klassifikations-)Problemen in der Sensorik,
2. die Anfälligkeit der Funktionalität der rigiden Symbolverarbeitungsprogramme im Fall von fehlerbehaftetem Programmcode,
3. die fehlende Kontextsensitivität und das daraus entstehende sog. „Rah-

282 S. z.B. A. CLARK: *Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1989. PP. 17-21, 114-18.

283 S. Fn. 281.

S. auch z.B. J.A. FODOR: *Psychosemantics*. MIT Press. Cambridge/MA. 1987. P. 17.

284 Unter einer sog. „Proposition“ (engl. “proposition”) versteht man in der Logik und Linguistik in Anlehnung an G. FREGE: *Der Gedanke. Eine logische Untersuchung*. Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus. Hf. 1. 1918-19. S. 58-77 (wiederabgedruckt in G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): *Logische Untersuchungen*. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966. S. 30-53 den „Gedanken“ (engl. “thought”) bzw. den gedanklichen Inhalt, der in einer Aussage enthalten ist, d.h. das, was ein Aussage- bzw. Behauptungssatz ausdrückt, also dessen „Sinn“, m.a.W. die kleinste Wissenseinheit, die eine selbständige, d.h. von anderen Wissenseinheiten unabhängige, wahrheitsfähige Aussage bilden kann.

285 Eingehend hierzu s. z.B. H. Maurer: *Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte*. Kap. 4.1, 4.11-4.15. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

286 Einen Überblick hierzu bieten z.B. Chr. ELIASMITH / W. BECHTEL: *Symbolic versus Subsymbolic*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 291-92 – G. STRUBE: *Kognition*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 310 – T. HORGAN / J. TIENSON: *A Non-classical Framework for Cognitive Science*. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 311-16 – M. KURTHEN: *Neurosemantik. Grundlagen einer Praxiologischen Kognitiven Neurowissenschaft*. F. Enke Verlag. Stuttgart. 1992. S. 301-302.

287 S. eingehend H. Maurer: *Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte*. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

menproblem“ (engl. “frame problem”)²⁸⁸ bei der Einordnung von neuen verfügbaren Daten,

4. die mangelnde Generalisierungsleistung bei symbolorientierten Lernverfahren und
5. die Selbstbeschränkung auf Symbolverarbeitung innerhalb eines einzigen Systems.

288 S. hierzu einfürend z.B. M. SHANAHAN: The Frame Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1-4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 144-50.

2.2 KONZEPTION DER KONNEKTIONISTISCHEN THEORIE²⁸⁹

In Konkurrenz zur klassischen Symboltheorie besteht die Hauptidee des konnektionistischen Kognitionsmodells in der Übertragung von Funktionen, Prinzipien und Strukturen aus der (kognitiven) Neurobiologie, der medizinischen Neurophysiologie und der kognitiven (Neuro-)Psychologie auf die technischen Informationsverarbeitungs-Systeme in der sog. „Neuroinformatik“ (engl. „neuroinformatics“)²⁹⁰, d.h. die mathematische, modelltheoretische Abstraktion der konnektionistischen Theorie, die im Folgenden in Grundzügen kurz dargelegt wird, ist vor allem der Beschaffenheit und der Arbeitsweise des menschlichen Gehirns nachempfunden (engl. „brain style modeling“²⁹¹), wobei es sich jedoch um eine stark vereinfachte Nachbildung handelt²⁹²:

2.21 KONNEKTIONISTISCHE METHODE: KONNEKTIONISTISCHE („SUBSYMBOLISCHE“) INFORMATIONSVERARBEITUNG AUF DER BASIS DER „VEKTORIELLEN FORM“ IM SINNE DER THEORIE DER (KÜNSTLICHEN) NEURONALEN NETZWERKE

2.210 Unter dem Begriff des sog. „Konnektionismus“ (engl. „connectionism“)²⁹³, der konnektionistischen Signal- bzw. Informationsverarbeitungs-„Theo-

289 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des gleichnamigen Kapitels 3. meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

290 Einführend s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 4. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2003 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1996.

Unter dem Fachbereich der sog. „Neuroinformatik“ (engl. „neuroinformatics“) versteht man ein (interdisziplinäres) Teilgebiet der Informatik, das sich mit der internen Informationsverarbeitungsweise in neuronalen Systemen, v.a. im menschlichen Gehirn, befaßt, um diese in mathematische Modelle bzw. (Neuro-)Architekturen umzusetzen und in technischen Systemen anzuwenden.

291 S. G. STRUBE: Kognition. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 311.

292 S. hierzu im einzelnen z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 51-53.

293 Grundlegend für das konnektionistische Paradigma war das Standardwerk: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986 und der Artikel: P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 1-23.

Einige der wichtigsten Publikationen über den Konnektionismus sind z.B. P. SMITH CHURCHLAND: Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986 – P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989 – P.M. CHURCHLAND: The Engine of Reason, the Seat of the Soul. A Philosophical Journey into the Brain. The MIT Press. Cambridge/Mass. 1995 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002 – A. CLARK: Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1989 – A. CLARK: Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1993 – T. HORGAN / J. TIENSON: Connec-

rie²⁹⁴, versteht man demnach, allgemein gesagt, die Anwendung der komplexen parallelen Informationsverarbeitung im Rahmen der Theorie der künstlichen neur(-on-)alen Netz(-werk-)e auf die Thematik der (Neuro-)Kognition, weshalb man auch von "Parallel Distributed Processing (PDP)"²⁹⁵ spricht, mit Bezug auf das grundlegende Standardwerk des konnektionistischen Paradigmas der U.S.-amerikanischen Psychologen David E. RUMELHART und James L.

tionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996 – T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991 – C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995 – P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces. The Geometry of Thought. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000 – G.F. MARCUS: The Algebraic Mind. Integrating Connectionism and Cognitive Science. Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA. 2001.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 6.15.

Eine Einführung hierzu bieten z.B. Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism. In: E. CRAIG (Ed.): Concise Routledge Encyclopedia of Philosophy. Routledge. London, New York. 1998. PP. 166-67 – W. BECHTEL: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. PP. 200-10 – J.A. FELDMAN / L. SHASTRI: Connectionism. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 680-87 – J.L. McCLELLAND: Cognitive Modeling, Connectionist. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 137-39 – W. RAMSEY: Connectionism, Philosophical Issues. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 186-88 – R. SUN: Artificial Intelligence. Connectionist and Symbolic Approaches. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Vol. 2. Pergamon/Elsevier Science. Oxford. 2001. PP. 786-87 – J. GARSON: Connectionism. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (July 7, 2010 Edition). From: <http://plato.stanford.edu/entries/connectionism/> – F. KURFESS: Konnektionismus. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 327-28 – Chr. KEMKE: Der Neuere Konnektionismus. Informatik Spektrum. Bd. 11. 1988. S. 143-62 – G. STRUBE: Neokonnektionismus: Eine neue Basis für die Theorie und Modellierung menschlicher Kognition. Psychologische Rundschau. Bd. 41. 1990. S. 129-43.

S. auch G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991 – G. HELM: Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1991 – M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001 – Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006 – H. WELDELE: Syntaktische und Referenzielle Sprachverstehensprozesse aus konnektionistischer Perspektive. Dissertation. Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftliche Fakultät. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br. 2011.

Der Begriff „Konnektionismus“ leitet sich ab von engl. "connect" (dt. „verbinden, verknüpfen“) und geht nach M.H. MARX: Connectionism. In: R.J. CORSINI (Ed.): Encyclopedia of Psychology. 2nd Ed. Vol. 1. John Wiley & Sons. New York u.a. 1994. P. 301 auf den U.S.-amerikanischen Psychologen Edward L. THORNDIKE zurück.

294 Nach G. HATFIELD: Repräsentation und kognitive Regeln in konnektionistischen Systemen. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 138-39 stellt der Konnektionismus keine Theorie dar, „sondern umfaßt eine Gruppe von Theorien (...), die ein gemeinsames Interesse an komputationalen Systemen teilen, die durch ‚konnektionistische‘ Basisoperationen gekennzeichnet sind.“

McCLELLAND: "PARALLEL DISTRIBUTED PROCESSING: EXPLORATIONS IN THE MICROSTRUCTURE OF COGNITION" aus dem Jahr 1986.

2.211 Ein sog. „(Künstliches) Neur(-on-)ales Netz(-werk) (KNN)“ (engl. „(Artificial) Neur(-on-)al Net(-work) (ANN)“) ²⁹⁶ kann als ein gerichteter und gewichteter mathematischer Graph i.S. der Graphentheorie ²⁹⁷ angesehen werden: Es besteht aus einer Vielzahl von einzelnen, recht einfachen (Verarbeitungs-)Ein-

295 Was das vor allem im Rahmen der sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. „symbolism vs. connectionism debate“) ausgetragene Thema des epistemischen Status der konnektionistischen Theorie betrifft, d.h., u.a. auch die Frage, welcher der drei verschiedenen Erklärungsebenen i.S. D. MARR's eine konnektionistische Position bzw. (Neuro-)Architektur zuzuordnen ist, m.a.W., welchen Erklärungsanspruch sie im Vergleich zu der klassischen Symbol(-verarbeitungs-)theorie (engl. „classical symbol-processing theory“) hinsichtlich der Angemessenheit der jeweiligen Modellierung von kognitiven Prozessen und Strukturen einnimmt, wird im allgemeinen dem sog. „PDP-Ansatz“ (engl. „PDP approach“), der, zusammen mit z.B. P.M. CHURCHLAND / P. SMITH CHURCHLAND, die Position eines sog. „eliminativen Konnektionismus“ (engl. „eliminative connectionism“) vertritt, entweder der sog. „strukturierte Konnektionismus“ (engl. „structured connectionism“) i.S. J.A. FELDMAN's / D.H. BALLARD's gegenübergestellt, der sog. „implementationale Konnektionismus“ (engl. „implementational connectionism“) i.S. D.S. TOURETZKY's, der sog. „hybride Konnektionismus“ (engl. „hybrid connectionism“) i.S. R. SUN's oder der sog. „integrative Konnektionismus“ (engl. „integrative connectionism“) i.S. P. SMOLENSKY's.

Grundlegend s. z.B. P. SMITH CHURCHLAND: *Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/ Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986. PP. 395-99, v.a. P. 396 – J.A. FELDMAN / D.H. BALLARD: *Connectionist Models and their Properties*. *Cognitive Science*. Vol. 6. 1982. PP. 205-54 – J.A. FELDMAN: *Dynamic Connections in Neural Networks*. *Biological Cybernetics*, 46. 1982. PP. 27-39 – D.S. TOURETZKY: *Connectionism and Compositional Semantics*. In: J.A. BARNDEN / J.B. POLLACK (Eds.): *High-Level Connectionist Models*. *Advances in Connectionist & Neural Computation Theory*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1991. PP. 17-31 – R. SUN: *CONSYDERR: A Two-Level Hybrid Architecture for Structuring Knowledge for Commonsense Reasoning*. In: R. SUN / L.A. BOOKMAN (Eds.): *Computational Architectures Integrating Symbolic and Connectionist Processing. A Perspective on the State of the Art*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1995. PP. 247-81 – P. SMOLENSKY: *Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture*. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. PP. 223-90.

Eingehend s. z.B. G. MARCUS: *Rethinking Eliminative Connectionism*. *Cognitive Psychology*. Vol. 37. 1998. PP. 243-82.

Einführend s. z.B. M. POSPESCHILL: *Konnektionismus und Kognition. Eine Einführung*. Kohlhammer Verlag. Stuttgart. 2004 – M. HILARIO: *An Overview of Strategies for Neurosymbolic Integration*. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): *Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches*. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 13-35 – Tr.E. LANGE: *Hybrid Connectionist Models. Temporary Bridges over the Gap between the Symbolic and the Subsymbolic*. In: J. DINSMORE (Ed.): *The Symbolic and Connectionist Paradigms: Closing the Gap*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 237-90 – St. WERMTER / R. SUN: *An Overview of Hybrid Neural Systems*. In: St. WERMTER / R. SUN (Eds.): *Hybrid Neural Systems*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 1-13 – R. SUN: *An Introduction to Hybrid Connectionist-Symbolic Models*. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): *Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches*. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 1-10.

S. auch H. WELDLE: *Syntaktische und Referenzielle Sprachverstehensprozesse aus konnektionistischer Perspektive*. Dissertation. Wirtschafts- und Verhaltenswissenschaftliche Fakultät. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br. 2011. S. 26-28.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 1.13, 2.29, 5.1.05, 6.15.01.

S. auch Fn. 293.

296 Eine Einführung hierzu bietet z.B. A. ZELL: *Simulation Neuronaler Netze*. 2. Aufl. R. Oldenbourg

heiten (engl. "(processing) units")²⁹⁸, den sog. „Knoten“ (engl. "nodes"), die (technische) Neuronen (engl. "neurons")²⁹⁹ darstellen, und zeichnet sich durch eine massiv parallele³⁰⁰ und distribuierte³⁰¹ Informationsverarbeitung zwischen diesen Verarbeitungseinheiten aus, die untereinander netzwerkartig über gewichtete Verbindungen (engl. "connections") verschaltet sind, den sog. „Kanten“ (engl. "edges"), die (technische) Synapsen (engl. "synapses")³⁰² darstellen.

Diese in einem mathematischen Modell abstrahierte neuronale Informations- bzw. Signalübertragung und -verarbeitung ist also der Funktionsweise der biologischen Neuronen und Synapsen und der neurophysiologischen Prozesse im

Verl. München, Wien. 1997 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995 – G.D. REY / K.F. WENDER: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011 – E. DAVALO / P. NAÏT: Neural Networks. MacMillan. London. 1991 – A. GRAUEL: Neuronale Netze. Grundlagen und mathematische Modellierung. BI Wissenschaftsverlag. Mannheim u.a. 1992 – H.A. MALLOT / W. HÜBNER / W. STÜRZL: Neuronale Netze. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 84-124 – S. KNIELING: Einführung in die Modellierung künstlich neuronaler Netzwerke. WiKu-Verlag für Wissenschaft und Kultur. 2007.

S. auch H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 70-195 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 251-329 – P. SMITH CHURCHLAND / T.J. SEJNOWSKI: The Computational Brain. MIT Press. Cambridge/MA. 1992.

Zu den mathematischen Aspekten von künstlichen neuronalen Netzen s. z.B. B. HAMMER / T. VILLMANN: Mathematical Aspects of Neural Networks. In: Proceedings of the European Symposium on Artificial Networks (ESANN'2003). Bruges, Belgium, 23-25 April 2003. 2003. PP. 59-72.

297 Zum Begriff des sog. „(gerichteten) mathematischen Graphen“ z.B. Sv.O. KRUMKE: Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. 2. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2009. S. 7.

298 Diese (Verarbeitungs-)Einheiten werden i.d.R. in mehreren sog. „Schichten“ (engl. "layers"), bestehend aus den sog. Eingabeeinheiten (engl. "input units"), den versteckten Einheiten (engl. "hidden units") und den Ausgabeeinheiten (engl. "output units") hintereinandergeschaltet. S. im einzelnen hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.25.

Zu den verschiedenen Typen von Neuronen und (Netz-)Architekturen in künstlichen neuronalen Netzen s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 73-74, 76-79, 97-345 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 117-602 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 17-283 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 29-172, 251-375.

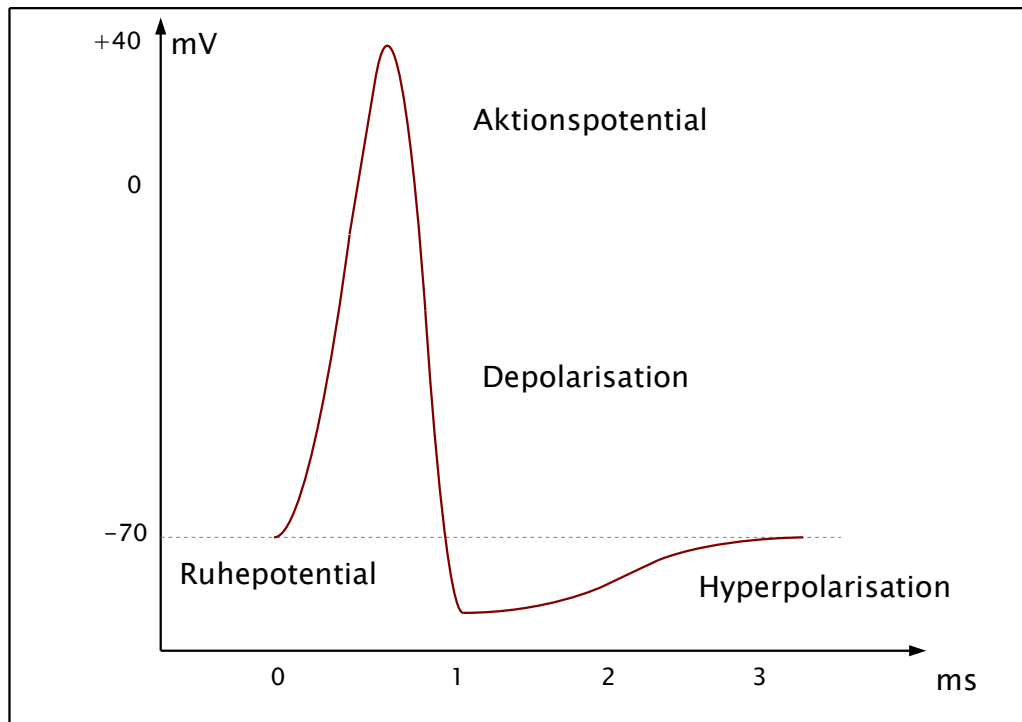
299 Zu den verschiedenen mathematischen Modellen von biologischen Neuronen s. z.B. M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 66-75 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 93-107.

300 Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 2.22.

301 Die gebräuchlichere deutsche Übersetzung des englischen Ausdrucks "distributed information processing" lautet „verteilte Informationsverarbeitung“.

302 S. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 71-72.

menschlichen (Neo-)Kortex nachempfunden³⁰³: Das Modell basiert dabei auf der Simulation der neurobiologischen Information bzw. des neurobiologischen Signals im menschlichen Gehirn, das darin besteht, daß das sog. „Membranpotential“ (engl. “membrane potential”) eines biologischen Neurons aus dem



Graphik.05: Schematisches Diagramm eines sog. „Aktionspotentials“ (engl. “action potential”) (angelehnt an Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011. S. 20).

Zustand des sog. „Ruhepotentials“ (engl. “resting potential”) heraus – entlang seines Axons – ein sog. „Aktionspotential“ (engl. “action potential”)³⁰⁴ generiert, d.h. einen neuroelektrischen Impuls erzeugt, m.a.W. das postsynaptische Neuron „feuert“, u.z. unter der Bedingung, daß die zeitliche und räumliche Summation der Aktionspotentiale der präsynaptischen Neuronen, die entlang ihrer präsynaptischen Axone über die neurochemischen Synapsen auf die Dendriten des postsynaptischen Neurons übertragen werden, ein bestimmtes

303 S. z.B. L. SQUIRE et al. (Eds.): Fundamental Neuroscience. 3rd Ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam, Heidelberg. 2008. PP. 41-245 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2009. S. 83-111, 113-47 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL (Hrsg.): Neurowissenschaften. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996 S. 139-54, 167-84, 225-48.

304 Zum Begriff des sog. „Aktionspotentials“ (engl. “action potential”) s. z.B. L. SQUIRE et al. (Eds.): Fundamental Neuroscience. 3rd Ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam, Heidelberg. 2008. PP. 117-31 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2009. S. 83-111 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL (Hrsg.): Neurowissenschaften. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996 S. 167-84.

sog. „Schwell(-en-)wertpotential“ (engl. “threshold potential”) übersteigt, wobei eine Gewichtung anhand der synaptischen Intensität der Neurotransmitterübertragung im Synapsenspalt stattfindet (sog. „synaptische Plastizität“ (engl. “synaptic plasticity”))³⁰⁵ im Rahmen von eingehenden erregenden, exzitatorischen (engl. “excitatory”), oder hemmenden, inhibitorischen (engl. “inhibitory”) Impulsen (sog. „synaptische Integration“ (engl. “synaptic integration”))³⁰⁶ (s. Graphik.05).

Im konnektionistischen Modell der neuronalen Informationsverarbeitung ermittelt nun ein postsynaptisches Neuron seinen eigenen neuen Aktivierungszustand (engl. “state of activation”) $a_j(t+1)$, bestehend aus einem numerischen Aktivierungswert (engl. “activation value”),

$$a_j(t+1) = f_{act}[a_j(t), net_j(t), \Theta_j] \quad (17)$$

mittels einer – in der Regel nicht-linearen sigmoiden – sog. „Aktivierungsfunktion“ (engl. “activation function”)³⁰⁷ f_{act} (s. Graphik.07), bestehend aus dem

305 S. z.B. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2009. S. 865-94 – Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2011. S. 160-64.

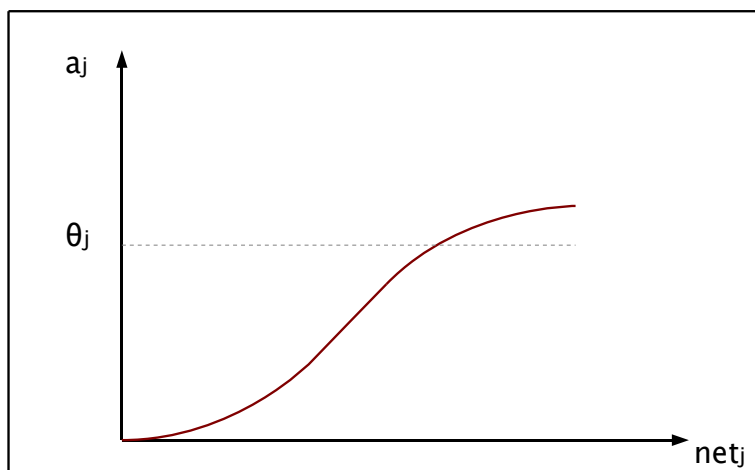
306 S. z.B. L. SQUIRE et al. (Eds.): Fundamental Neuroscience. 3rd Ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Heidelberg. 2008. PP. 242-45 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL (Hrsg.): Neurowissenschaften. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996 S. 226.

307 Man verwendet i.d.R. eine S-förmige, nichtlineare sog. „sigmoide Aktivierungsfunktion“ (engl. “sigmoid activation function”) bzw. „Transferfunktion“ (engl. “transfer function”), die das Aktivierungsverhalten von biologischen Neuronen noch am besten simulieren, z.B. die sog. „logistische Aktivierungsfunktion“ (engl. “logistic activation function”) gemäß

$$f_{log}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (18)$$

oder die Aktivierungsfunktion des sog. „Tangens Hyperbolicus“ (engl. “hyperbolic tangent”) $\tanh(x)$ gemäß

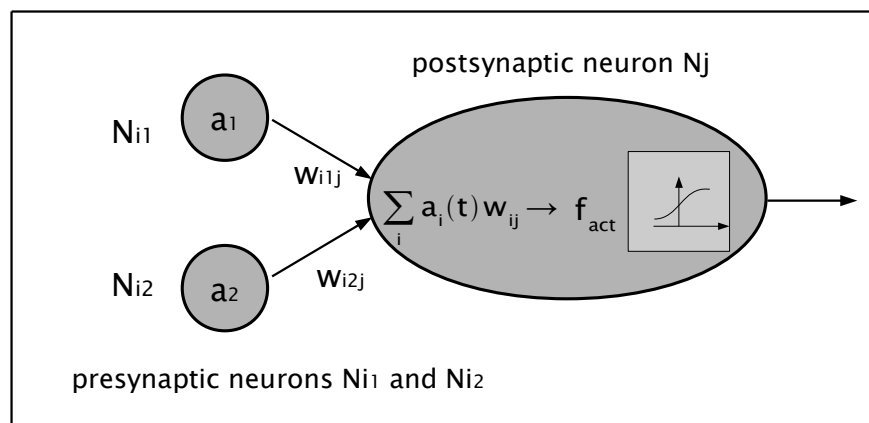
$$f_{\tanh}(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (19)$$



alten Aktivierungszustand $a_j(t)$, der sog. „Netzeingabe“ (engl. “net input”) $net_j(t)$ und dem sog. „Schwellenwert“ (engl. “threshold”, “bias”) Θ_j , wobei die Netzeingabe

$$net_j(t) = \sum_i o_i(t)w_{ij} \text{ bzw. } net_j(t) = \sum_i a_i(t)w_{ij} \quad 308 \quad (20)$$

anhand der sog. „Propagierungsfunktion“ (engl. “propagation function”) berechnet wird, d.h. anhand der Summe aus den Produkten der jeweiligen Ver-



Graphik.06: Schematisches Diagramm des mathematischen Modells der Informations- bzw. Signalübertragung zwischen technischen Neuronen mit einer Aktivierungsfunktion f_{act} , das die Basis darstellt zur Konstruktion von künstlichen neuronalen Netzwerken (in Anlehnung an S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. P. 11, G. HOUGHTON (Ed.): Connectionist Models in Cognitive Psychology. Psychology Press. Hove. 2005. P. 20 und H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin u.a. 1998. S. 94).

bindungsgewichte w_{ij} ³⁰⁹ zu den präsynaptischen Neuronen N_{i1} und N_{i2} mit deren Ausgaben $o_i(t)$ bzw. $a_i(t)$ ³¹⁰: Falls nun die alte Aktivierung zusammen

Graphik.07: Schematische Darstellung einer sog. „logistischen Aktivierungsfunktion“ (engl. “logistic activation function”) (s. Formel.17) (angelehnt an Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2011. S. 30).

S. hierzu z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 90-92.

Eine allgemeinere Darstellung i.S. der Dynamischen Systemtheorie findet sich in J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 175-77.

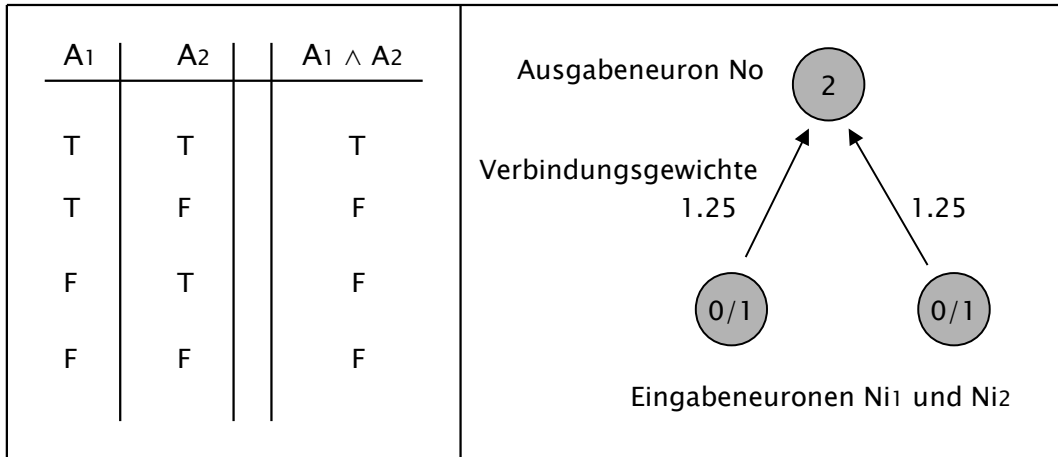
Zum Ähnlichkeitstransformierenden und -brechenden Abbildungsaspekt von nicht-linearen Aktivierungsfunktionen s. z.B. Bj. Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag, Kiel. 2006. S. 70-72.

308 Für den vereinfachenden Fall, daß die Ausgaben der präsynaptischen Neuronen $o_i(t)$ gleich ihrer Aktivierungen $a_i(t)$ sind.

309 Das Gewicht der Verbindung von Einheit i nach Einheit j wird durch w_{ij} bezeichnet.

310 Eine alternative, an dem neurobiologischen Konzept der sog. „präsynaptischen Hemmung“

mit der Netzeingabe den Schwellenwert übersteigt, wird das betreffende postsynaptische Neuron N_j aktiv (s. Graphik.06 und Graphik.08).



Graphik.08: Schematisches Diagramm zur Darstellung der grundlegenden Funktionsweise der Informations- bzw. Signalübertragung im Rahmen eines künstlichen neuronalen Netzwerks, die anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht wird: Die logische Semantik einer Konjunktion – dargestellt im linken Graphiksegment – wird in eine geeignete vektorbasierte konnektionistische Netzstruktur übertragen – dargestellt im rechten Graphiksegment. Die technischen Neuronen i.S. von W.St. McCULLOCH und W. PITTS³¹¹ funktionieren dabei als ein sog. „logisches Gatter“ (engl. „logical gate“): Das Ausgabeneuron feuert, wenn die gewichtete Summe der Eingaben den Schwellenwert überschreitet, wobei die Operationen der Vektoraddition und Vektormultiplikation verwendet werden, sodaß sich folgende Berechnungen ergeben (angelehnt an A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 74):

- 1.: $1 \cdot 1.25 + 1 \cdot 1.25 = 1.25 + 1.25 = 2.50 > 2.00$
- 2.: $1 \cdot 1.25 + 0 \cdot 1.25 = 1.25 + 0.00 = 1.25 < 2.00$
- 3.: $0 \cdot 1.25 + 1 \cdot 1.25 = 0.00 + 1.25 = 1.25 < 2.00$
- 4.: $0 \cdot 1.25 + 0 \cdot 1.25 = 0.00 + 0.00 = 0.00 < 2.00$

Der Wahrheitswert 'T' entspricht dabei dem Aktivierungswert '1' der Eingabeneuronen N_{i1} und N_{i2} , und der Wahrheitswert 'F' entspricht dem Aktivierungswert '0'.

(engl. „presynaptic inhibition“) orientierte Netzeingabe im Rahmen des sog. „Sigma-Pi-Neuronenmodells“ ergibt sich gemäß

$$net_j(t) = \sum_i w_{ij} \prod_k o_k(t). \quad (21)$$

S. hierzu z.B. M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 74-75 – H.-H. BO-
THE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin
u.a. 1998. S. 102.

311 S. W.St. McCULLOCH / W. PITTS: A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics. Vol. 5. 1943. PP. 115-33, v.a. PP. 121, 130, 131 – W.St. Mc-
CULLOCH / W. PITTS: The Statistical Organization of Nervous Activity. Biometrics. Vol. 4. 1948. PP.
91-99.

S. einführend z.B. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 29-50 – G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010. P. 370.

S. auch KI. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Man-
kind. Springer. Berlin u.a. 1994. PP. 201-202 – KI. MAINZER: Gehirn, Computer, Komplexität. Spring-
er Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 145-49.

2.212 In der sog. „Gewichts-“ oder „Konnektionsmatrix“ (engl. “connection matrix”)³¹² W werden alle Verbindungsgewichte eines Netzwerkes zusammengefaßt, wobei die hohe Konnektivität der Neuronen durch eine entsprechend hohe Anzahl von gewichteten Verbindungen oder sog. „Konnektionen“ (engl. “connections”, “links”) erreicht wird. Wie die neuroanatomischen Synapsen verfügen diese Verbindungen also über ein(-e) Gewicht(-ung) (engl. “weight”) bzw. eine Kopplungsstärke (engl. “strength”), die einen erregenden, exzitatorischen (engl. “excitatory”), oder hemmenden, inhibitorischen (engl. “inhibitory”) Einfluß eines präsynaptischen Neurons auf sein postsynaptisches Neuron durch einen numerischen (Zahl-)Wert darstellt, d.h. anhand von gezielten inkrementellen³¹³ Synapsenmodifikationen über die Erhöhung oder Erniedrigung von bestimmten Verbindungsgewichten im Rahmen von bestimmten Lernregeln kann in einem künstlichen neuronalen Netzwerk gelernt werden.

2.213 Die sog. „Lernregel“ (engl. “learning rule”)³¹⁴, auch als das sog. „Lernverfahren“ bezeichnet³¹⁵, ist dabei ein Algorithmus³¹⁶, gemäß dem ein künstliches neuronales Netz lernt, für eine vorgegebene Eingabe eine gewünschte Ausgabe zu liefern. Die sog. „HEBB'sche Lernregel“ (engl. “HEBB('s) rule”)³¹⁷, benannt nach dem kanadischen Neurophysiologen Donald O. HEBB,

$$\Delta w_{ij} = \eta o_i a_j, \quad (22)$$

die die Grundlage für die meisten komplizierteren Lernregeln³¹⁸ darstellt, und

312 Zum Begriff der sog. „Gewichts-“ oder „Konnektionsmatrix“ (engl. “connection matrix”) s. einführend z.B. G. PALM: Neural Assemblies. An Alternative Approach to Artificial Intelligence. Springer-Verlag, Berlin. 1982. P. 105.

313 Unter dem Ausdruck „inkrementell“ (engl. “incremental”) versteht man im allgemeinen eine schrittweise Erhöhung des (Zahl-)Wertes einer Variablen, wobei in der Informatik bei (imperativen) Programmiersprachen der elementare Inkrement- bzw. Dekrement-Operator dazu dient im Programmablauf Schleifenkonstruktionen zu ermöglichen.

314 S. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 83-86.

315 S. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 83.

Siehe die Ausführungen in Kpt. 4.2, 4.4.01, 4.4.02.

316 S. Kpt. 1.1 Fn.12.

317 Sie wurde in seinem Buch “THE ORGANIZATION OF BEHAVIOR. A NEUROPSYCHOLOGICAL THEORY” aus dem Jahr 1949 wie folgt formuliert (P. 62): “When an axon of cell A is near enough to excite a cell B and repeatedly or persistently takes part in firing it, some growth process or metabolic change takes place in one or both cells such that A's efficiency, as one of the cells firing B, is increased.”

Siehe eingehend z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 351-85.

Siehe einführend z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 84.

318 Von der allgemeinen mathematischen Form der HEBB'schen Lernregel nach D.E. RUMELHART / G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: A General Framework for Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 53, definiert durch

$$\Delta w_{ij} = \eta h(o_i, w_{ij}) g(a_j, t_j), \quad (23)$$

damit das Fundament für das sog. „Prinzip der neuronalen Plastizität“ (engl. „principle of neuronal plasticity“)³¹⁹ in den kognitiven Neurowissenschaften darstellt, besagt: Wenn das postsynaptische Neuron j eine Eingabe von einem präsynaptischen Neuron i erhält und beide gleichzeitig stark aktiviert sind, dann wird das Verbindungsgewicht w_{ij} erhöht, wobei Δw_{ij} die Änderung des Verbindungsgewichts w_{ij} , η eine konstante Lernrate, o_i die Ausgabe des präsynaptischen Neurons i und a_j die Aktivierung des postsynaptischen Neurons j darstellt.

Was die zu Grunde liegenden Informationen betrifft, kann man nun – im wesentlichen³²⁰ – die Lernverfahren in zwei Klassen unterteilen, u.z., zum einen, in die Klasse des sog. „überwachten Lernens“ (engl. „supervised learning“)³²¹, wonach im Lernprozeß eine externe Instanz zusätzlich zu jedem Eingabemuster als Zusatzinformation auch das beste Ausgabemuster angibt, und, zum anderen, in die Klasse des neurobiologisch plausibleren sog. „unüberwachten Lernens“ (engl. „unsupervised learning“)³²², wonach der Lernalgorithmus, z.B. der KOHONEN-Algorithmus³²³ oder der GROSSBERG-Algorithmus³²⁴, selbständig versucht, aus der Trainingsmenge der zufällig verteilten Eingabemuster anhand von sog. „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen“ (engl. „probability den-

wobei hier die erwartete Aktivierung t_j , der sog. „teaching input“, als Parameter hinzukommt, sind vor allem die sog. „Delta-Regel“ (engl. „delta rule“), auch „WIDROW-HOFF-Regel“ (engl. „WIDROW-HOFF rule“) genannt, abgeleitet, und das Lernverfahren des sog. „Backpropagation“. S. hierzu z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 85-86 – W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 356-62 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. 2nd Ed. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1998. PP. 264-65.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 4.23.

319 S. z.B. P. SMITH CHURCHLAND / T.J. SEJNOWSKI: The Computational Brain. MIT Press. Cambridge/MA. 1992. PP. 239-329 – Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011. S. 145-71.
S. auch Fn. 305.

320 S. z.B. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 74-75 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 84-85.

Bisweilen wird eine Dreiteilung vorgenommen, sodaß das sog. „bestärkende Lernen“ (engl. „reinforcement learning“) als dritte Klasse hinzugenommen wird.

S. hierzu z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 64-65 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 93-96 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 90-91.

321 S. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 64, 65-66 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 93, 95.

322 S. z.B. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 97-119 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 162-73 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 63-64 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 93, 95-96.

323 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

324 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.02.

sity functions")³²⁵ deren statistische Verteilung zu bestimmen, sodaß man z.B. im Rahmen des Problems der korrekten Klassifikation von Datenvektoren eine Kategorie mit Hilfe eines statistischen vektorbasierten Prototypen erzeugen kann.

Ein neuronales Netz wird demnach nicht programmiert im konventionellen Sinn, sondern vielmehr „trainiert“: Anhand von (Anwendungs-)Beispielen in einer speziellen Lernphase, in der prototypische Paare von Eingabe- und Ausgabemustern dem Netzwerk präsentiert werden, erfolgt eine zielgerichtete Anpassung³²⁶ der anfangs meist zufällig eingestellten Verbindungsgewichte des Netzwerks an eine vorgegebene Problemstellung in Form von (Daten-)Vektoren.

Zusammenfassend kann demnach gesagt werden, daß die basale konnektionistische Komputation mittels der in den Neuronen sich fortpflanzenden Aktivierungsausbreitung entsprechend den sich ständig ändernden, gesamten Verbindungsgewichten in den Synapsen des künstlichen neuronalen Netzwerks erfolgt.³²⁷

2.214 Aufgrund dieser fundamentalen konnektionistischen Komputationsalgorithmen spricht man deshalb beim Konnektionismus auch von einer sog. „sub-symbolischen Theorie“ (engl. „subsymbolic theory“)³²⁸, da sie die kognitive Kompetenz – im Rahmen einer sog. „bottom-up Methode“³²⁹ – „unterhalb“ der Ebene der Symbolstrukturen zu erklären versucht, u.z. derart, daß (Neuro-)Kognition – i.d.R. anhand von Selbstorganisationsprozessen³³⁰ ohne eine externe Kontrollfunktion anhand von Programminstruktionen – von den sub-symbolischen Mikroelementen in Form von mathematischen Vektoren zu komplexeren, als Symbolstrukturen zu interpretierenden numerischen Vektor-, Tensor-, Attraktor- und Oszillatorkonstruktionen³³¹, den sog. „(dynamischen) Aktivierungsmustern“ (engl. „(dynamical) pattern of activations“)³³², stattfindet.

325 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

326 Zur dynamischen Adaptation in Neuronalen Netzwerken s. z.B. M.A. ARBIB: Dynamics and Adaptation in Neural Networks. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 23.

327 S. G. HATFIELD: Repräsentation und kognitive Regeln in konnektionistischen Systemen. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 139.

328 Zum Grundbegriff des sog. „Subsymbols“ (engl. „subsymbol“) im Subsymbolischen Paradigma Paul SMOLENSKY's, das anhand seines „Kaffeetassen“- Beispiels (engl. „The Coffee Story“) erläutert wird, wird auf die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kpt. 5.1-5.2. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 26-34 verwiesen.

329 S. hierzu z.B. D.E. RUMELHART / G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: A General Framework for Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 57-59.

330 S. z.B. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 30.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 4.4.01, 4.4.02, 5.

331 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.

332 Vgl. z.B. M. PESCHL: Repräsentation in natürlichen und künstlichen (konnektionistischen) neuronalen Systemen. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta

2.22 KONNEKTIONISTISCHE REPRÄSENTATION UND REPRÄSENTATIONSTYOLOGIE

2.221 Die „Information“ eines konnektionistischen Systems wird anhand der gewichteten Verknüpfungsmuster der einzelnen Verarbeitungseinheiten re-präsentiert, m.a.W. in der Netzwerkarchitektur oder -topologie, d.h. anhand der Art, Anzahl, Anordnung und den Ausgaben der Verarbeitungseinheiten, insbesondere den sog. „verdeckten (Verarbeitungs-)Einheiten“ (engl. “hidden (processing) units”), den Schwellenwerten und der Lernregel, aber im Ergebnis vor allem in der Verteilung der Verbindungsgewichte, also der vektoriellen (Konnektions-)Matrix des Netzwerks.³³³

Die Vertreter des Konnektionismus betonen dabei, daß sich demnach die Information – im Gegensatz zu klassischen Künstlichen Intelligenz (KI)-Systemen – in der Regel nicht an lokalisierbaren Stellen in einem Programm befindet, sondern „implizit“ und „dezentral“ in der verteilten Gesamtheit der sich überlap-penden Verbindungen und in mehreren (Verarbeitungs-)Einheiten zugleich steckt (sog. „Informations-Holismus“ (engl. “informational holism”)³³⁴), weshalb man auch von “Parallel Distributed Processing (PDP)”³³⁵ oder sog. „Verteilter Künstlicher Intelligenz (VKI)“ (engl. “Distributed Artificial Intelligence (DAI)”)³³⁶ und Multi-Agenten Systemen (engl. “Multi-Agent Systems”)³³⁷ spricht. Unter ei-ner sog. „distribuierten (,verteilten‘) Repräsentation“ (engl. “distributed repre-sentation”)³³⁸ einer Information in Form von (Konnektionsmatrix-)Vektoren ver-

Verlag. Stuttgart. 1996. S. 579 – G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 132-33.

333 Nach G. HATFIELD: Representation and Rule-Instantiation in Connectionist Systems. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. 1991. PP. 95-96 gibt es zwei Verwendungsweisen des Begriffs der Repräsentation im Konnektionismus, u.z. in Bezug auf die Verbindungsgewichte oder das sich vollziehende Aktivierungsmuster eines Netzwerks.

334 S. z.B. A. CLARK: Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1989. PP. 107-11 – H.L. DREYFUS / St.E. DREYFUS: Künstliche Intelligenz. Von den Grenzen der Denkmaschine und dem Wert der Intuition. Rowohlt Taschenbuch Verl. Reinbek bei Hamburg. 1987. S. 52, 128-30 sprechen von “Holistic Similarity Recognition” mit Hinweis auf das Modell des optischen Hologramms. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.4.

335 Grundlegend für das konnektionistische Paradigma war das Buch von D.E. RUMELHART und J.L. McCLELLAND: “PARALLEL DISTRIBUTED PROCESSING: EXPLORATIONS IN THE MICROSTRUCTURE OF COGNITION” im Jahr 1986.

S. auch Fn. 293.

336 S. einführend hierzu z.B. G.M.P. O'HARE (Ed.): Foundations of Distributed Artificial Intelligence. Wiley. New York u.a. 1996.

337 S. einführend hierzu z.B. J. FERBER: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston/MA. 1999.

338 S. eingehend z.B. G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART: Distributed Representations. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 77-109.

S. einführend z.B. T. PLATE: Distributed Representation. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1002-1004 – M. PESCHL: Repräsentation in natürlichen und künstlichen (konnektionistischen) neuronalen Systemen. In: G. STRUBE et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 579-80

S. auch G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI.

steht man demnach im Rahmen der Arbeitsweise der Netzwerkverarbeitung, daß keine einzelne Verarbeitungseinheit eines Netzes eine syntaktisch oder semantisch bestimmbare Teilaufgabe vollzieht, vielmehr einen nicht im voraus bestimmbaren, manchmal sogar gar keinen, von vornherein bestimmbaren, Anteil der Gesamtaufgabe bearbeitet³³⁹, sondern nur ein Verband von Verarbeitungseinheiten, ein sog. „verteiltes Aktivierungsmuster“ (engl. “distributed pattern of activation”)³⁴⁰ erzeugend, dies leistet. Der Begriff „parallel“ (engl. “parallel”)³⁴¹ bedeutet dabei, daß der Prozeß der Informationsverarbeitung in einem künstlichen neuronalen Netz nicht mehr gemäß einer klassischen von NEUMANN-Architektur³⁴² verläuft, d.h die Abarbeitung eines Verarbeitungsschritts kann erst dann erfolgen, wenn der vorhergehende Arbeitsschritt ganz abgeschlossen worden ist.

B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 26-28 – G. HELM: Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1991. S. 100.

Man versucht, ein semantisches Konzept bzw. eine sog. „Proposition“ (s. Kpt. 2.145, Fn. 283, 284) nicht einer einzelnen Verarbeitungseinheit zuzuordnen, sondern über eine Gruppe von Einheiten zu verteilen, sodaß ein und dieselbe Gruppe von Einheiten an der Repräsentation von mehreren Konzepten beteiligt ist, weshalb sich verschiedene Konzepte überlagern können, wodurch (begriffliche) Ähnlichkeiten unmittelbar ausgedrückt werden können.

Zur Differenzierung in die verschiedenen Repräsentationstypen “strictly” bzw. “ultra local”, “(fully) local”, “semi-local” bzw. “distributed” und “fully distributed” wird auf die Ausführungen in Kpt. 2.222.1-2.222.4 verwiesen.

339 Bei einer sog. „(ultra-)lokalen Repräsentation“ wäre dies aber der Fall. S. im einzelnen hierzu Kpt. 2.222.1.

340 S. z.B. G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART: Distributed Representations. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 77-109, v.a. PP. 79-87.

341 S. hierzu z.B. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 10.

342 S. hierzu z.B. K.B. KORB: Symbolism and Connectionism. AI Back at a Join Point. Proceedings of the Conference on Information, Statistics and Induction in Science (ISIS'96). World Scientific. Singapore. 1996. P. 4.

Unter der sog. „klassischen von NEUMANN-Architektur“, benannt nach dem österreichisch-ungarischen, später in den USA tätigen Mathematiker John von NEUMANN, versteht man in der Informatik ein grundlegendes (Referenz-)Modell der Funktionsweise der heutzutage verwendeten Computer, wonach in einem gemeinsamen Speicher sowohl Programminstruktionen als auch die zu verarbeitenden (Programm-)Daten abgelegt werden können.

Zur komputationalen Äquivalenz eines künstlichen neuronalen Netzwerks und einer klassischen von NEUMANN-Architektur s. z.B. St. FRANKLIN / M. GARZON: Neural Computability. In: O.M. OMIDVAR (Ed.): Progress in Neural Networks. Vol. 1. Ablex Publishing Corporation. Norwood/NJ. 1991. PP. 127-45.

2.222 In Anlehnung an T. van GELDER³⁴³, N.E. SHARKEY³⁴⁴, S.J. THORPE³⁴⁵, P. SMOLENSKY und G. LEGENDRE³⁴⁶ kann man m.E. im Konnektionismus nun vier grundlegende Repräsentationstypen³⁴⁷ unterscheiden, u.z. die Typen "strictly" bzw. "ultra local", "(fully) local", "semi-local" bzw. "distributed" und "fully" bzw. "strongly distributed", wobei diese ein Spektrum abdecken, das die Kombination von mentalen Objektkomponenten erlaubt, beginnend mit der diskreten, lokalen Konkatenation (engl. "concatenation")³⁴⁸ von Symbolen in der Klassischen Symboltheorie bis hin zur Überlappung oder Überlagerung, der sog. „Superposition“ (engl. "superposition")³⁴⁹, von völlig verteilten subsymbolischen Repräsentationen im Konnektionistischen Paradigma.

2.222.1 Beim ersten Repräsentationstyp, mit "strictly local"³⁵⁰ oder "ultra local"³⁵¹ bezeichnet, wird ein mentales Objekt (engl. "item"³⁵²), z.B. das Wort

343 S. T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 236-38 – T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 33-59 – T. van GELDER: Defining "Distributed Representation". Connection Science. Special Issue on Philosophical Issues in Connectionist Modeling. Vol. 4. No. 3-4. 1992. PP. 175-91 – T. van GELDER: Why Distributed Representation is Inherently Non-Symbolic. In: G. DORFFNER (Hrsg.): Konnektionismus in Artificial Intelligence und Kognitionforschung. 1990. PP. 58-66.

Zu den Vorteilen einer verteilten Repräsentation s. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1003-1004.

344 S. N.E. SHARKEY: Connectionist Representation Techniques. Artificial Intelligence Review. Vol. 5. 1991. PP. 143-67.

345 S. J. THORPE: Localized Versus Distributed Representations. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 643-45.

346 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. London. 2006. PP. 160-75.

347 Die Repräsentationstypologie orientiert sich vor allem an T. van GELDER und P. SMOLENSKY, während S.J. THORPE zum Teil eine davon verschiedene Bezeichnung verwendet.

Eine vereinfachte Darstellung, angelehnt an die von P. SMOLENSKY, findet sich in M. TYE: Representation in Pictorialism and Connectionism. In: T. HORGAN / J. TIENSON: Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. PP. 170-73.

348 Vgl. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 575-76.

Zum Begriff der „Konkatenation“ (engl. "concatenation") i.S.d. Theoretischen Informatik als zweistellige Operation der algebraischen Struktur des sog. „Monoids“ zur Erzeugung von Zeichenfolgen s. z.B. U. SCHÖNING: Theoretische Informatik – kurzgefaßt. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg, Berlin. 1997. S. 183.

Zur Verwendung eines allgemeineren Begriffs der räumlichen und zeitlichen Konkatenation s. T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. No. 3. 1990. PP. 359-60.

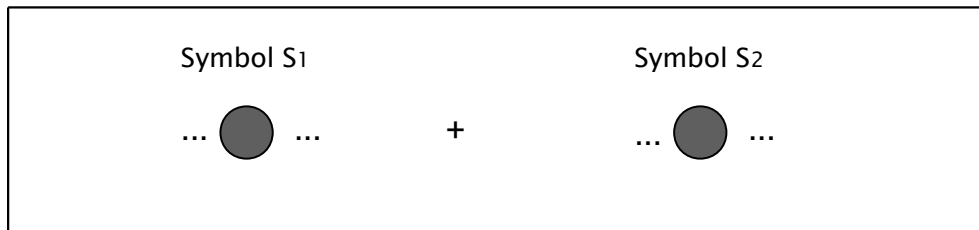
349 S. Fn. 248.

350 S. Fn. 244.

351 S. Fn. 247.

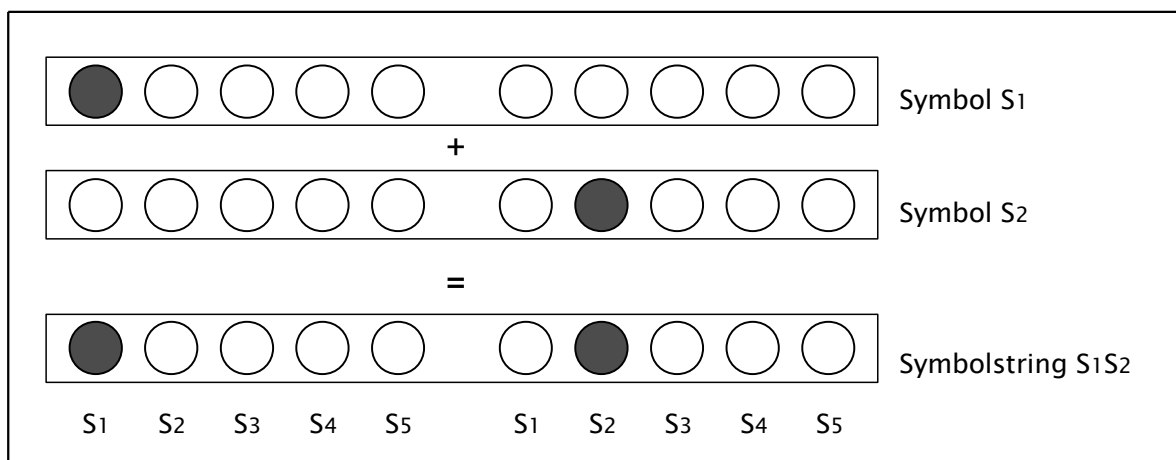
352 S. Fn. 244.

„Kaffee“, nur anhand einer Zelle bzw. eines Neurons repräsentiert, wobei der Aktivierungszustand der anderen Zellen irrelevant ist, was bedeutet, daß man diesen Typ direkt in eine Symbolkonkatenation transformieren könnte (s. Graphik.09).



Graphik.09: Schematische Darstellung des Repräsentationstyps "strictly local" oder "ultra local" (angelehnt an T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 236).

2.222.2 Beim zweiten Repräsentationstyp, mit "local"³⁵³ oder "fully local"³⁵⁴ bezeichnet, wird ein mentales Objekt zwar auch nur anhand einer Zelle bzw.



Graphik.10: Schematische Darstellung des Repräsentationstyps "local" oder "fully local" (angelehnt an P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 167 und T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 236).

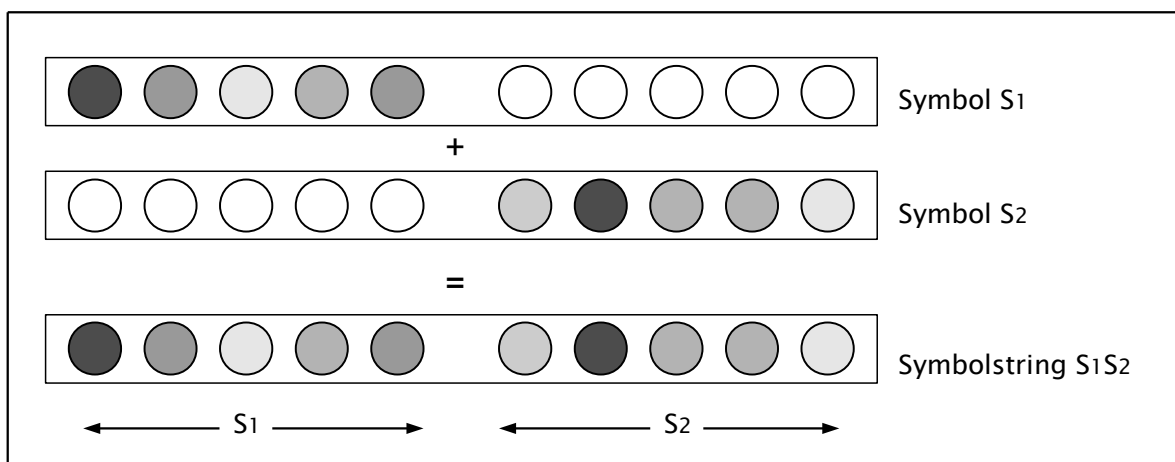
eines Neurons repräsentiert, aber als Grenzfall einer sog. "sparse distributed representation" (dt. „spärlich verteilte Repräsentation“), d.h. in einem Verband oder „Pool“ (engl. "pool") von Zellen, in dem jeweils nur eine einzige Zelle aktiv ist, aber der Aktivierungszustand der anderen Zellen nun von Relevanz ist

353 S. Fn. 244, 246.

354 S. Fn. 247.

(s. Graphik.10).

2.222.3 Demgegenüber wird bei dem dritten Repräsentationstyp, mit "distributed-basic notion"³⁵⁵ oder mit "semi-local"³⁵⁶ bezeichnet, ein mentales Objekt anhand eines Zell- bzw. Neuronenverbandes repräsentiert, wobei jedoch alle Zellen des Verbandes an der Repräsentation mitwirken, wohingegen die Aktivierungszustände der Zellen von anderen Verbänden aber irrelevant sind, d.h. zwei mentale Objekte, z.B. die Wörter „Kaffee“ i.S.v. „Tasse mit Kaffee“ und „Kaffee“ i.S.v. „Kanne mit Kaffee“, werden anhand von zwei völlig getrennten Zellverbänden repräsentiert, weshalb noch keine Überlagerung oder Überlappung der zu lernenden Muster stattfindet (s. Graphik.11).



Graphik.11: Schematische Darstellung des Repräsentationstyps "distributed-basic notion" oder "semi-local" als Vektoraddition von zwei Vektoren mit jeweils fünf aktiven und disjunkten Vektorkomponenten, wobei die Graustufen die verschiedenen Grade der jeweiligen Neuronenaktivität angeben (angelehnt an P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 171 und T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 236).

2.222.4 Eine Überlappung oder Überlagerung, der sog. „Superposition“ (engl. "super(-im-)position")³⁵⁷, erfolgt erst beim vierten Repräsentationstyp, mit "ful-

355 S. Fn. 244.

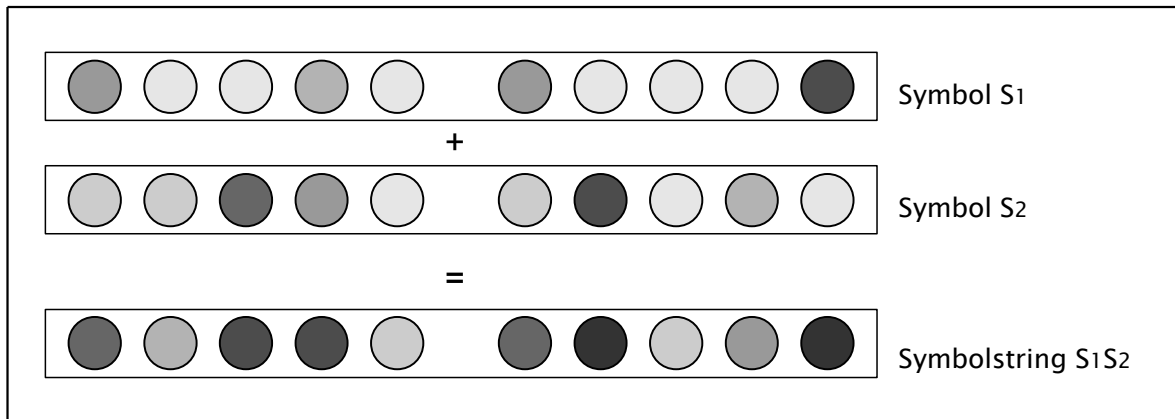
356 S. Fn. 247.

357 S. hierzu einführend z.B. A. CLARK: Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1993. PP. 17-20 mit Bezug auf T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 33-59, v.a. PP. 42-48.

S. auch T. van GELDER: Defining "Distributed Representation". Connection Science. Special Issue on Philosophical Issues in Connectionist Modeling. Vol. 4. 1992. PP. 176-79.

Der finnische Ingenieur und Neuroinformatiker T. KOHONEN: Self-Organization and Associative Memory. Springer-Verl. New York u.a. 1984. P. 11 umschreibt dies treffend: "In distributed memories, every memory element or fragment of memory medium holds traces from many stored items, i.e., the representations are superimposed on each other. On the other hand, every piece of stored information is spread over a large area."

ly distributed"³⁵⁸ (dt. „völlig verteilt“) oder mit „strongly distributed“³⁵⁹ bezeichnet, indem ein mentales Objekt anhand eines Zell- bzw. Neuronenverbandes repräsentiert wird, derart, daß ein zu lernendes Muster nicht nur (ausschließlich) von den Zellen eines (ganz bestimmten) Zellverbandes repräsentiert wird,



Graphik.12: Schematische Darstellung des Repräsentationstyps "fully distributed" oder "strongly distributed" als Vektoraddition von zwei Vektoren mit jeweils zehn aktiven und distribuierten Vektorkomponenten, wobei die Graustufen die verschiedenen Grade der jeweiligen Neuronenaktivität angeben und das Superpositionsprinzip dadurch veranschaulicht wird, daß die jeweiligen Graustufen der Vektorkomponenten addiert werden (angelehnt an P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 171).

sondern darüber hinaus derselbe Zellverband, und damit zumindest eine³⁶⁰ bis

Die Begriffe "superposition" bzw. "superimposition" werden bei T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): *Philosophy and Connectionist Theory*. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. P. 43 einer differenzierten Definition unterworfen: "(...) the terms superimposed and superposed are only largely synonymous. In what follows I will use superposed on the ground that it is shorter, although rejecting certain domain-specific connotations such as the notion of wave addition in physics. Superposed as I intend it is defined in what follows.

Intuitively, the representings of two distinct items are superposed if they are coextensive – if, in other words, they occupy the same portion of the resources available for representing. Thus in connectionist networks we can have different items stored as patterns of activity over the same set of units, or multiple different associations encoded in one set of weights. This point can be stated a little more precisely as follows. Suppose we have some accurate way to measure the amount of the resources involved in representing a given content item C. Then a representation R of an item C is conservative if the amount of the resources involved in representing C is equal to R itself (no more and no less). A representation R of a series of items c_i is superposed just in case R is a conservative representation of each c_i ."

358 S. Fn. 247.

359 S. Fn. 244.

360 In diesem Fall spricht man nur von "weakly distributed representation".

S. z.B. T. van GELDER: Defining "Distributed Representation". *Connection Science*. Special Issue on Philosophical Issues in Connectionist Modeling. Vol. 4. No. 3-4. 1992. PP. 180, 182 – T. van GELDER: Why Distributed Representation is Inherently Non-Symbolic. In: G. DORFFNER (Hrsg.): *Konnektionismus in Artificial Intelligence und Kognitionsforschung*. 1990. PP. 58-60

hin zu jeder Zelle dieses Zellverbandes, auch an der Repräsentation von anderen Mustern mitwirkt (s. Graphik.12), m.a.W. zwei oder mehrere Muster, z.B. die Wörter „Kaffee“ i.S.v. „Tasse mit Kaffee“ und „Kaffee“ i.S.v. „Kanne mit Kaffee“, werden gleichzeitig anhand ein und desselben (Gesamt-)Zellverbandes repräsentiert, sodaß es nicht länger möglich ist, zwei oder mehrere mentale Objekte in ihren Repräsentationen physisch zu separieren, sondern lediglich anhand der verschiedenen (Zell-)Aktivitätskonfigurationen des betreffenden (Gesamt-)Zellverbandes.

Die strukturelle Korrespondenz zwischen dem zu repräsentierenden Objekt und den repräsentationalen neuronalen Ressourcen besteht nun darin, daß das Objekt in einen Objektvektor überführt wird und in Form einer distribuierten Transformation die statistischen Korrelationen der Objektvektoren in einer Serie von Objektrepräsentationen von den (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren der (verdeckten) Neuronen „extrahiert“ werden, derart, daß eine (Un-)Ähnlichkeitsrelation unter den (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren besteht auf Grund der internen Vektorkomponentenkonfiguration, die – im Rahmen der sog. „Potentiallandschafts“-Analogie³⁶¹ – graphisch interpretiert werden kann als eine (Un-)Ähnlichkeit³⁶² der topologischen Lokalisation der (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren im dynamischen Systemzustandsraum. Diese präzise Lokalisation basiert dabei auf einer exakten mathematischen numerischen Distanzmetrik, z.B. der sog. „EUKLIDischen Distanz“ (engl. “Euclidean distance”)³⁶³, die definiert ist mit

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (24)$$

wonach z.B. in ihrer internen Vektorkomponentenkonfiguration strukturell ähnliche (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren, d.h. die mit einer geringen numerischen Distanz ihrer Vektorkomponenten versehen sind, „benachbarte“ Punkte im dynamischen (System-)Zustandsraum einnehmen.

Ein zu speicherndes Informationselement³⁶⁴ im Sinne von Objektvektorkomponenten wird also – in Analogie zu einem (optischen) Hologramm³⁶⁵ – derart

361 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.23.

362 Manchmal wird zur Feststellung der (Un-)Ähnlichkeit eines Informationselements auch das sog. Skalarprodukt verwendet.

S. hierzu z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 172.

363 Zum Begriff der sog. „Euklidischen Distanz“ (engl. “Euclidean distance”) s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 26-27.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.210.

Eine alternative numerische Distanzmetrik bildet die sog. „HAMMING-Distanz“ (engl. “Hamming distance”).

S. hierzu z.B. A. SCHERER: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 26.

364 Unter einem sog. „Informationselement“ oder „-atom“ kann man z.B. eine „Zelle“ oder ein „Pixel“ eines zu repräsentierenden Buchstabens verstehen.

S. auch die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.

365 Vgl. z.B. T. KOHONEN: Self-Organization and Associative Memory. Springer-Verl. New York u.a.

„distribuiert“, daß die Objektvektorkomponenten dieses Informationselements, indem sie mit jedem der (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren der Neuronen abgeglichen werden, gleichzeitig „(Berechnungs-)Teil“ der Aktivierungs- und Propagierungsfunktion³⁶⁶ jedes Neurons wird, wobei – bei einer völlig verteilten Transformationsfunktion – die Objektvektorkomponenten des jeweiligen Informationselements gleichzeitig „(Berechnungs-)Teil“ der betreffenden (Repräsentations- oder Synapsen-)Vektoren jedes der Neuronen ist.

2.23 KONNEKTIONISTISCHE VEKTORBASIERTE INFORMATIONSDYNAMIK: ENERGIEFUNKTION UND „POTENTIALLANDSCHAFTS“- METAPHER

2.231 Die Beschreibung der Systemdynamik eines künstlichen neuronalen Netzwerks erfolgt, wie bereits erwähnt³⁶⁷, dadurch, daß man eine Verarbeitungseinheit bzw. einen Verband von Verarbeitungseinheiten eines künstlichen neuronalen Netzwerks als eine Dimension in einem Koordinatensystem

1984, P. 81: "(...) the spatial distributedness of memory traces, the central characteristic of holograms, may mean either of the following two facts: (i) Elements in a data set are spread by a transformation over a memory area, but different data sets are always stored in separate areas. (ii) Several data sets are superposed on the same medium in a distributed form."

In Anlehnung an K.S. LASHLEY's Begriff der "neural equipotentiality" muß nach T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 48-52 eine Repräsentation dem sog. "principle of equipotentiality" genügen, um eine holographische Funktion zu besitzen. Dieses Prinzip der Äquipotentialität wird in T. van GELDER: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 237 wie folgt umschrieben: "In some cases, an item is represented by a pattern over a pool of units, and the pattern over any subpool (...) also suffices to represent the item. Thus every part or aspect of the item is represented in superimposed fashion over the whole pool. The standard example is the optical hologram (...)."

Zur Hologramm-Analogie siehe auch T. HORGAN / J. TIENSON: Structured Representations in Connectionist Systems? In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. P. 212 – T. van GELDER: Distributed Representation. PhD Thesis. University of Pittsburgh. 1989. PP. 229-33.

Zur Kritik am Begriff der sog. „holographischen Repräsentation“ s. z.B. J.A. FELDMAN / L. SHASTRI: Connectionism. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 684.

Zur Kritik der Verwendung des Begriffs einer sog. „holistischen Repräsentation“ s. z.B. T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 52-53: "(...) describing a distributed representation as holistic might be a reference to the fact that, when a representation R is superposed, each part of R is involved in representing number of items at once, and in that sense reflects the 'whole' content. Similarly, in superposed schemes R functions as a representation of a number of items at once; in that sense, one state represents the whole content, or each item is only represented in the context of the whole content. Alternatively, describing distributed representations as holistic might be a reference to equipotentiality, where each part represents the 'whole' content. Each of these senses gestures in the direction of some important aspect of distributed representation; however, superimposing them in the one (dare I say, holistic) concept results, in this case, in little more than a blur."

366 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.211, 4.4.01, 4.4.02.

367 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.221.

betrachtet, sodaß damit ein sog. „ n -dimensionaler Systemzustandsraum“ (engl. „ n -dimensional system state space”)³⁶⁸ aufgespannt wird, und, anhand der Transformationsfunktion, d.h. anhand der Aktivierungs- und Propagierungsfunktionen einschließlich der betreffenden Lernalgorithmen, die eine Anpassung der Verbindungsgewichte zwischen den Verarbeitungseinheiten bewirken, der Übergang von einem (Aktivierungs-)Zustand, dargestellt durch einen numerischen Vektor in Form von Vektorkoordinaten, vereinfacht ausgedrückt, als ein bestimmter Punkt im Zustandsraum, in einen neuen, zeitlich folgenden (Aktivierungs-)Zustand beschreiben läßt. Eine zeitliche (Ab-)Folge von Aktivierungszuständen erzeugt dann eine (Bahn-)Bewegung eines Punktes, die sog. „Trajektorie“ (engl. „trajectory”)³⁶⁹, durch den Zustandsraum, wobei dann das konvergente bzw. divergente (nicht-lineare) dynamische Systemverhalten in Form von sich selbst stabilisierenden, resonanten sog. „Attraktoren“ (engl. „attractors”)³⁷⁰ mit einem entsprechenden sog. „Attraktorbecken“ bzw. „Attraktorbasin“ (engl. „attractor basin”) eine informativ-repräsentationale Funktion besitzt³⁷¹, und der Grad dieser Konvergenz bzw. Divergenz von benachbarten Trajektorien im Phasenraum, d.h. deren Stabilitätsverhaltens, anhand des sog. „LYAPUNOV-Exponenten“ (engl. „LYAPUNOV exponent”)³⁷² angegeben werden kann, benannt nach dem russischen Mathematiker und Physiker Aleksandr M. LYAPUNOV.

2.232 Diese auf Grund der Transformationsfunktion sich entwickelnden internen Systemzustandsabfolgen kann man nun zur Veranschaulichung als eine n -

368 Zum Begriff des sog. „ n -dimensionalen Systemzustandsraums“ (engl. „ n -dimensional system state space”) s. die Ausführungen in Kpt. 1.221.

369 Zum Begriff der sog. „Trajektorie“ (engl. „trajectory”) s. die Ausführungen in Kpt. 1.221.

370 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.222.

371 S. z.B. T. STONIER: *Information and Meaning: An Evolutionary Perspective*. Springer. London u.a. 1997. P. 127: „If the message is able to resonate with some part of the internal information environment (the context) it will have meaning for the system; if not, it will be ignored.”

372 Zum Begriff des sog. „LYAPUNOV-Exponenten“ (engl. „LYAPUNOV exponent”) s. z.B. H.-O. PEITGEN / H. JÜRGENS / D. SAUPE: *Chaos. Bausteine der Ordnung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. S. 45-50, 276-89 – J. ARGYRIS / G. FAUST / M. HAASE: *Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1995. S. 159-99, v.a. S. 179, 183, 191 – W. METZLER: *Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung*. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 425-44 – A. KATOK / B. HASSELBLATT: *Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems*. Cambridge University Press. Cambridge. 1995. PP. 660-72 – M. BRIN / G. STUCK: *Introduction to Dynamical Systems*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 23-25 – R.C. ROBINSON: *An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004. v.a. PP. 271-76, 276-78 – J. GUCKENHEIMER / Ph. HOLMES: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Rev. and Corr. 3rd Printing*. Springer. New York u.a. 1990. PP. 283-84 – J.C. ROBINSON: *Dynamical Systems. Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos. 2nd Ed.* CRC Press. Boca Raton/FLA. 2009. PP. 88-91, 387-92 – R.W. LEVEN / B.-P. KOCH / B. POMPE: *Chaos in dissipativen Systemen. 2. Aufl.* Akademie-Verlag. Berlin. 1994. S. 64-88.

S. auch G. SCHIEPEK / G. STRUNK: *Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater*. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994. S. 77-79 – B. KRALE-MANN: *Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze*. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 59-60.

dimensionale „Potential-“ bzw. „Gebirgslandschaft“³⁷³ mit „Gebirgszügen“, „Gebirgstälern“ und „Gebirgsgipfeln“ darstellen, wobei jede dieser (Bahn-)Bewegungen von Punkten der „Gebirgslandschaft“ als eine spezifische dynamische „Information“ des künstlichen neuronalen Netzwerks interpretiert werden kann³⁷⁴ (s. Graphik.13): In Analogie zum Konzept der potentiellen Energie eines dynamischen Systems in der Physik wird jedem Punkt im Systemzustandsraum anhand der Transformationsfunktion ein Funktionswert zugewiesen, der als „Gesamtaufwand“³⁷⁵ des künstlichen neuronalen Netzwerks betrachtet werden kann, einen bestimmten Zustand einzunehmen, wobei im Rahmen der klassischen sog. „Gradientenabstiegsmethode“ (engl. „gradient descent method“)³⁷⁶ das System dazu tendiert, daß der „Aufwand“ optimal minimiert wird, d.h. der negative Gradient der (Aufwands-)Funktion³⁷⁷ zeigt in Richtung ihres steilsten Abstiegs, m.a.W. die Bahn eines Punktes bewegt sich im Zustandsraum in Richtung seines steilsten Abstiegs schnellstmöglichst immer bergab, sodaß zumindest ein lokales Minimum und günstigenfalls ein globales Minimum berechnet wird. M.a.W., der „(Aufwands-)Wert“ eines Punktes in der Potential- bzw. Gebirgslandschaft entspricht dabei dem Aktivierungsgrad eines Systemzustands im Sinne der (künstlichen) sog. „Energie“ (engl. „energy“) oder – mit umgekehrtem Vorzeichen – der sog. „Harmonie“ (engl. „harmony“)³⁷⁸ des dynamischen Systems gemäß der sog. „LYAPUNOV-Funktion“ (engl. „LYAPUNOV function“)³⁷⁹ im Rahmen der mathematischen Stabilitätstheorie (engl. „stability

373 Zur besseren Veranschaulichung wird eine 2- oder 3-dimensionale Gebirgslandschaft verwendet.

S. z.B. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 148-51.

374 Eingehend hierzu A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 17-18, 21.

Einführend s. z.B. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 108-11, 149.

S. auch H. LENK: Das Denken und sein Gehalt. R. Oldenbourg Verl. München. 2001. S. 174, 177, 180-85 – Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 61-63.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 4.22.1, 4.23 und 4.3.02.

375 S. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 110.

376 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.23.

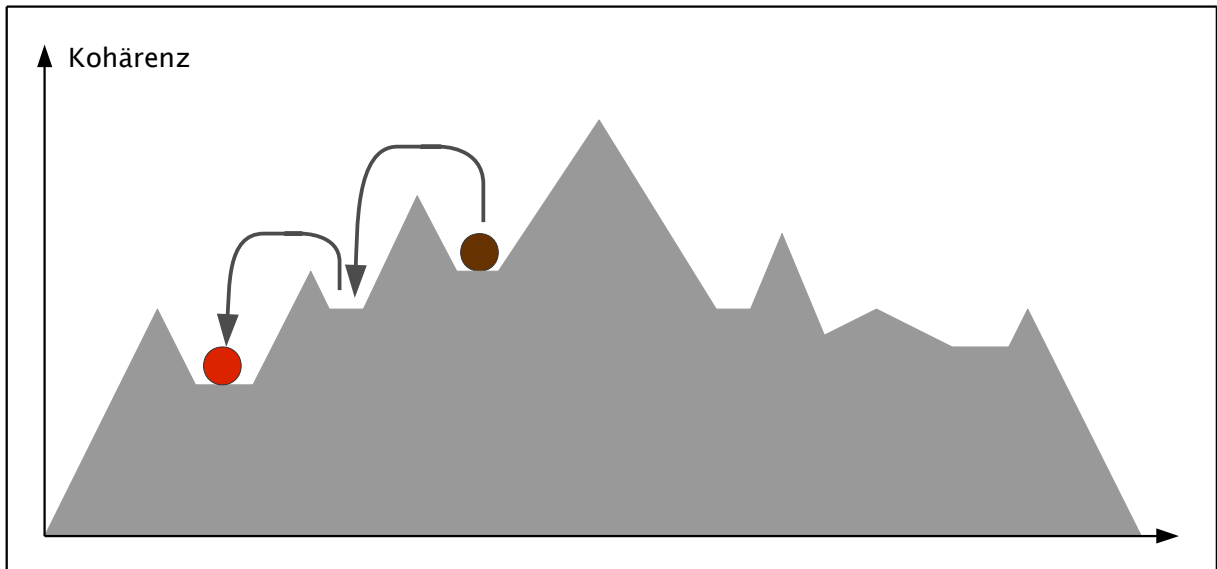
377 S. Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 61.

378 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.

379 Eingehend s. z.B. M.A. COHEN / St. GROSSBERG: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 13. 1983. PP. 815-26.

Einführend s. z.B. H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. v.a. PP. 114, 116 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 48-52 – M.W. HIRSCH / St. SMALE: Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra. Academic Press. New York u.a. 1974. PP. 192-99 – M. BRIN / G. STUCK: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. P. 20. S. auch P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: Neural Network Modeling. Statistical Mechanics and

theory")³⁸⁰: Ein künstliches neuronales Netzwerk ist demnach immer bestrebt, im Rahmen einer Energieminimierung anhand der Gradientenabstiegs-Metho-



Graphik.13: Schematische Darstellung des Querschnitts einer Energie- bzw. Potentiallandschaft: Das Einnehmen eines (relativ) stabilen Systemzustands kann anhand einer rollenden Kugel in einer Gebirgslandschaft veranschaulicht werden, die versucht, eine möglichst tiefe Talmulde zu erreichen. Zuerst befindet sich die Kugel in einem lokalen (Energie-)Minimum (braune Kugel). Anhand der entsprechenden Parametereinstellungen in den Aktivierungs-

Cybernetic Perspective. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994. PP. 54-55 – R. UNBEHAUEN: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002. S. 131-38.

S. auch B. KOSKO: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992. PP. 69-73 – J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 177-80.

Eine LYAPUNOV-Funktion für das sog. „HOPFIELD-Netzwerk“ (s. Kap. 2.25.03) wird in Kap. 4.25 angegeben.

Zur Isomorphie des HOPFIELD-Netzwerks zum sog. „ISING-Modell“ in der statistischen Physik s. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 290-91.

Einführend zur Konvergenzanalyse des HOPFIELD-Netzwerks s. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 291-96.

Eingehend s. z.B. J. BRUCK: On the Convergence Properties of the Hopfield Model. Proceedings of the IEEE. Vol. 78. 1990. PP. 1579-85.

Einführend zur mathematischen Definition der sog. „LYAPUNOV-Funktion“ (engl. „LYAPUNOV function“) s. z.B. K. KÖNIGSBERGER: Analysis 2. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002. S. 160-61:

„Unter einer *Ljapunow-Funktion* zu einem kritischen Punkt x_0 eines Vektorfeldes $v: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ versteht man eine C^1 -Funktion $L: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ mit den beiden Eigenschaften:

(i) L hat in x_0 ein isoliertes Minimum mit $L(x_0) = 0$;

(ii) die Ableitung $\partial_v L$ von L längs des Feldes v nimmt nur Werte ≤ 0 an oder nur Werte ≥ 0 .“

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 1.222, Fn. 79, 5.2.06.2.

380 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.222, Fn. 78.

und Lernfunktionen eines Netzwerks kann nun erreicht werden, daß das System – mit verschiedenem Grad an Wahrscheinlichkeit – von einer Lösung zu einer anderen springt, d.h. geometrisch, die Kugel – im besten Fall – von einem lokalen in ein globales (Energie-)Minimum (rote Kugel) gelangt. Man kann sich dies dadurch veranschaulichen, indem man berücksichtigt, daß die betreffenden Parametereinstellungen die sog. „komputationale Temperatur“ (engl. „computational temperature“) des Systems steuern. Diese Temperatur kann man sich dabei als das (Aus-)Maß vorstellen, bis zu dem die gesamte Landschaft „in Schwingung versetzt wird“, sodaß die Kugel bei einer hohen Temperatur mit einem erhöhten Grad an Wahrscheinlichkeit eine Energiebarriere in Gestalt eines Berges überwinden kann, um in das nächst niedrigere Energieniveau zu gelangen. Während der Lernphase wird, nachdem das System die entsprechenden Eingabemuster gelernt hat, schließlich die Temperatur allmählich gesenkt, sodaß sich anhand des langsamen Abkühlens des Systems die Wahrscheinlichkeit erhöht, in einem (optimalen) Minimum nicht wieder „herausgerissen“ zu werden (in Anlehnung an M. KÖHLE: *Neurale Netze*. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 70-72, 104-108).

de³⁸¹ das globale Minimum der sog. „Energiefunktion“ (engl. „energy function“)³⁸² einzunehmen, was im Wege einer Fehlerverminderung einem Einspielen auf einen (relativ) stabilen (System-)Zustand mit maximaler Kohärenz (engl. „coherence“)³⁸³ hin entspricht, das als ein Gütefeststellungsverfahren betrachtet werden kann, inwieweit die Anpassung der Verbindungsgewichte an die dargebotenen Eingabemuster gelungen ist.³⁸⁴ Eine Gebirgstalmulde steht somit für einen Verband von konvergierenden Trajektorien i.S. eines Attraktors, der damit als eine kognitive „Repräsentation“ eines internen Systemkonzepts i.w.S.³⁸⁵ interpretiert werden kann, mit Bezug auf die eingegebenen Datenvektoren, und entspräche somit z.B. einem klassischen symbolbasierten semantischen Konzept.³⁸⁶

2.24 KONNEKTIONISTISCHE INFORMATIONSVERARBEITUNG: „REGELBEHERRSCHT“ VS. „REGELGELEITET“ VS. „REGELINSTANTIIEREND“

2.241 Wie bereits angedeutet, besteht ein grundlegender Unterschied zwischen konnektionistischer und symbolistischer Theorie darin, daß ein künstliches neuronales Netzwerk im Gegensatz zur Symbolverarbeitung „nur“ „regelfol-

381 Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 4.23.

382 S. hierzu z.B. G.W. COTTRELL: *Attractor Networks*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 256-57.

383 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.22, 4.24, 4.3.02.

384 Zum Beweis der Konvergenz für ein HOPFIELD-Netzwerk, daß es – unter der Annahme einer asynchronen Berechnungsvorschrift – aus einem beliebigen Netzzustand einen stabilen Endzustand mit einer niedrigeren Gesamtenergie erreicht, s. z.B. R. ROJAS: *Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 291-96.

Zum Beweis der Konvergenz für ein rekurrentes, vollverbundenes Netzwerk im allgemeinen s. z.B. Bj.Chr. KRALEMANN: *Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze*. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 167-71.

385 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 6.20.

Ein internes Systemkonzept kann dabei nicht nur eine begriffliche, sondern auch z.B. eine bildliche Darstellung beinhalten und kann – im Gegensatz zu einem Symbol – auch sämtliche Übergangs- oder Zwischenzustände von benachbarten „Gebirgstalmulden“ wiedergeben.

386 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 6.2.

gend“ (engl. “rule-following”)³⁸⁷, aber nicht „regelbeherrscht“ (engl. “rule-governed”)³⁸⁸ arbeitet, da das System keine (Verarbeitungs-)Regeln³⁸⁹ voraussetzt, und diese auch nicht notwendigerweise explizit repräsentiert bzw. implementiert sind³⁹⁰, sondern sich allenfalls das Netzverhalten mit seinem fallbezogenen Lernverfahren durch Regeln beschreiben läßt, d.b., daß die obersten Funktionsprinzipien (engl. “high level function principles”), wenn überhaupt, erst während oder nach dem Training des Netzes entstehen oder aufgedeckt werden, und nicht, wie bei der Symbolverarbeitung, bereits vor der Programmierung bzw. Implementierung des Systems feststehen (engl. “methodological and explanatory inversion”³⁹¹). M.a.W. die Systemeigenschaften eines Netzes sind also allenfalls nachträglich funktional erklärbar, aber in der Regel nicht vorhersagbar, da das regelfolgende Systemverhalten nicht explizit programmiert worden ist, d.h. keine systeminterne Repräsentation von Verarbeitungsregeln vorgenommen worden ist.

2.242 Eine Diskussion im Kontext der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte³⁹² besteht nun in der Kritik einiger Konnektionisten³⁹³ an der Klassischen Symboltheorie i.S.v. J.A. FODOR und Z.W. PLYSHYN, deren Kognitionstheorie in Form von „harten“ (Produktions-)Regeln über (Symbol-)Repräsentationen konstruiert (engl. “classical ‘rules and representations’ conception of cognition”³⁹⁴) werde³⁹⁵, wohingegen ein künstliches neuronales Netzwerk i.S. des “Parallel Soft Constraint Satisfaction Modeling”³⁹⁶ Kognition anhand von sog. „weichen

387 Zum Begriff „regelfolgend“ s. z.B. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 230.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 2.242.1.

388 Zum Begriff „regelbeherrscht“ s. z.B. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 229.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 2.242.1.

389 Nach G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 217 kristallisieren sich in der klassischen Künstlichen Intelligenz mindestens zwei grundlegende Typen von (Produktions-)Regeln heraus, u.z. die sog. „Transformations-“ und die „Definitionsregeln“, wohingegen im Konnektionismus die sog. “distributed soft rules” (dt. „verteilte weiche Regeln“) postuliert werden.

Hierzu wird auch auf die Ausführungen in Kpt. 2.131 verwiesen.

390 S. G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 229-30 – A.A.: T. HORGAN / J. TIENSON: Rules and Representations. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. P. 725, die das Kriterium der expliziten Repräsentation ablehnen.

391 S. A. CLARK: Connectionism, Competence, and Explanation. In: M.A. BODEN: The Philosophy of Artificial Intelligence. Oxford. 1990. PP. 297-99, 303.

392 Siehe hierzu die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kpt. 4. BoD-Verlag. Nordstedt. 2006, 2009.

393 Eine Einführung hierzu bieten z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Rules and Representations. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 724-26.

394 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Rules and Representations. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1999. P. 725.

395 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.12 und 2.13.

396 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.22.

Regeln“ (engl. “soft rules”)³⁹⁷ angemessener erklären könne.

2.242.1 Die Basis dieser Diskussion bildet dabei eine vom U.S.-amerikanischen Philosophen, Psychologen und Wissenschaftshistoriker Gary HATFIELD³⁹⁸ eingeführte Typologie von Systemen, die anhand der Verwendung von drei verschiedenen Begriffen einer „Regel“ voneinander abgegrenzt werden können, u.z. unterscheidet er einen ersten Systemtyp, der als „regelartig“ (engl. “rule described”) bezeichnet wird, wenn “a (...) system (...) simply obeys natural laws”, von einem zweiten Systemtyp, der als „regelgeleitet“ oder „regelfolgend“ (engl. “rule following”) bezeichnet wird, wenn “a (...) system conforms to the rule or law by virtue of an explicit representation of it”, und bezeichnet demgegenüber den konnektionistischen Systemtyp als „regelinstantiierend“ (engl. “rule instantiating”), womit z.B. die Aktivierungs- und Propagierungsfunktionen sowie die verschiedenen Lernregeln gemeint sind, die in grundlegender Weise die komputationale Architektur eines Netzwerks charakterisieren, indem sie dessen Informationsverarbeitungsprozesse derart einrichten, daß das Netzwerk eine ganz bestimmte Funktion berechnet, die eben von ihm „instantiiert“ wird, ohne daß diese „Regeln“ explizit repräsentiert wären. Dies vermeide nach G. HATFIELD³⁹⁹ das wenig überzeugende Ergebnis, zu dem J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN⁴⁰⁰ im Rahmen ihrer sog. „Modularitätsthese“ (engl. “modularity thesis”) gelangen, wonach ein weiter Bereich der Wahrnehmungsverarbeitung mit inferentiellen Symbolverarbeitungsprozessen gleichzusetzen sei, so daß diese Prozesse mit regelinstantiierenden Modellen des Konnektionismus als psychologisch und kognitiv charakterisiert werden können, ohne sich der Symbolverarbeitungstheorie mit ihrer Konzeption von propositionellen Einstellungen (engl. “propositional attitudes”)⁴⁰¹ als Kriterium für eine psychologische Analyse zu bedienen.

2.242.2 Die Verpflichtung der Klassischen Symboltheorie zur Verwendung von sog. „harten Regeln“ (engl. “hard rules”)⁴⁰² zur Manipulation und Transformation von Symbolrepräsentationen i.S. der sog. „logischen Form“ (engl. “logical

397 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.242.2.

398 Grundlegend s. G. HATFIELD: Representation and Rule-Instantiation in Connectionist Systems. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. 1991. PP. 90-112, v.a. PP. 90-91, 97-100.

Diese Typologie unterscheidet sich von derjenigen, die von G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 229-30 verwendet wird, der sich dabei auf D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986 beruft.

399 S. G. HATFIELD: Representation and Rule-Instantiation in Connectionist Systems. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. 1991. PP. 100-102.

400 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: How Direct is Visual Perception?: Some Reflections on Gibson's “Ecological Approach”. Cognition. Vol. 9. 1981. PP. 139-96, v.a. PP. 184-88 – J.A. FODOR: Methodological Solipsism Considered as a Research Strategy in Cognitive Psychology. The Behavioral and Brain Sciences. Vol. 3. 1980. PP. 63-109.

401 Zum Begriff der „Proposition“ (engl. “proposition”) und der „propositionellen Einstellung“ (engl. “propositional attitude”) wird auf die Ausführungen in Kpt. 2.145, Fn. 283, 284 verwiesen.

402 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Settling into a New Paradigm. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. P. 248.

form")⁴⁰³ ist nun vor allem von den U.S.-amerikanischen Philosophen und Wissenschaftstheoretikern Terry HORGAN und John TIENSON⁴⁰⁴ kritisiert worden, wonach es für den Konnektionismus weder notwendig noch erstrebenswert sei, sich dem Gebrauch von solchen Regeln anzupassen, vielmehr sei es plausibel, daß die konnektionistischen Modelle mit ihren sog. „weichen Gesetzen“ (engl. „soft laws“)⁴⁰⁵ im Rahmen einer psychologischen Theorie, z.B. den lokalen und subrepräsentationalen Aktivierungs- und Propagierungsfunktionen, die zwischen den individuellen Neuronen in einem künstlichen neuronalen Netzwerk ausgeführt werden, einen alternativen Typ von kausaler Interaktion erzeugen, bei der die Kausalverbindungen wie in einem „Kollektiv“ zusammenarbeiten, und bei der die kausalen Konsequenzen von individuellen Neuronenverbindungen oft durch den gegensätzlichen Einfluß von anderen Verbindungen aufgehoben (engl. „overruled“) werden können (sog. „soft weight satisfaction“⁴⁰⁶). Dies würde somit die Basis für eine angemessenere nichtklassische

403 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 116-19.

404 S. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 95-171 – T. HORGAN / J. TIENSON: Representation without Rules. Philosophical Topics. Vol. 17. No. 1. 1989. PP. 147-74 – T. HORGAN / J. TIENSON: Soft Laws. In: P.A. FRENCH / Th.E. UEHLING, Jr. / H.K. WETTSTEIN: Midwest Studies in Philosophy. Volume XV. The Philosophy of the Human Sciences. University of Notre Dame Press. Notre Dame/Indiana. 1990. PP. 256-79 – T. HORGAN / J. TIENSON: Settling into a New Paradigm. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 241-60 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 305-45, v.a. PP. 311-16 – T. HORGAN / J. TIENSON: Representations don't Need Rules: Reply to James Garson. Mind & Language. Vol. 9. No. 1. 1994. PP. 38-55, v.a. PP. 44-50. Im Gegensatz zur klassischen Symboltheorie, die eine sog. „Rules and Representations (RR)“-Konzeption vertritt, stelle das neue Paradigma des Konnektionismus nach T. HORGAN und J. TIENSON: Settling into a New Paradigm. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 247, 249 eine sog. „Representation Without Rules (RWR)“-Konzeption dar. Das sog. „syntactic argument“ i.S.v. T. HORGAN und J. TIENSON kritisiert K. AIZAWA: Representations without Rules, Connectionism and the Syntactic Argument. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 465-92 – A.A.: M. GUARINI: A Defense of Connectionism against the „Syntactic“ Argument. Synthese. Vol. 128. No. 3. 2001. PP. 287-317.

405 S. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 115-26, 127-44, v.a. P. 115, Fn. 10 – T. HORGAN / J. TIENSON: Soft Laws. In: P.A. FRENCH / Th.E. UEHLING, Jr. / H.K. WETTSTEIN: Midwest Studies in Philosophy. Volume XV. The Philosophy of the Human Sciences. University of Notre Dame Press. Notre Dame/Indiana. 1990. PP. 256-79, v.a. PP. 266-71 – T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. P. 41.

S. auch T. HORGAN / J. TIENSON: Representations don't Need Rules: Reply to James Garson. Mind & Language. Vol. 9. No. 1. 1994. PP. 38-55, v.a. P. 40 mit Bezug auf J.W. GARSON: No Representations without Rules: The Prospects for a Compromise between Paradigms in Cognitive Science. Mind & Language. Vol. 9. No. 1. 1994. PP. 25-37.

406 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Representations without Rules. Philosophical Topics. Vol. 17. No.1. 1989. P. 166: „The activation level of any node in the network, at any stage of processing, is normally the result of a conspiracy of causal input from several nodes; no single excitatory or inhibitory causal link determines what happens. Some causal links get „satisfied,“ in the sense that the node changes its activation level upwards or downwards in a direction consistent with the given link's excitatory or inhibitory causal influence. Other links get „violated“: the node changes its activation level in a contrary direction. We shall refer to this conspiratorial mode of cau-

Kognitionstheorie abgeben, in der die mathematischen Konstrukte der Dynamischen Systemtheorie, die auf der algorithmischen Ebene angewendet werden (engl. "algorithmic-level rules"), die harten Regeln der klassischen Symboltheorie verfeinern (engl. "refine") würden, die auf der repräsentationalen Ebene angewendet werden (engl. "Programmable Representation Level (PRL) Rules").⁴⁰⁷

2.25 DIVERSE BASALE (ARCHITEKTUR-)MODELLKONZEPTIONEN

Im folgenden werden drei grundlegende Netzwerke vorgestellt, die drei basalen Klassen von (Architektur-)Modellen⁴⁰⁸ im Konnektionismus entsprechen mit den dazugehörigen kognitiven Funktionen:

2.25.01 PERCEPTRON NACH Fr. ROSENBLATT

Das vom U.S.-amerikanischen Psychologen Frank ROSENBLATT entwickelte ursprünglich nur zweischichtige und zur visuellen Mustererkennung dienende sog. "Perceptron"⁴⁰⁹ stellt ein abstraktes Schema des visuellen Wahrneh-

sal interaction as *soft weight satisfaction*. The point we wish to stress is that soft weight satisfaction looks like a plausible kind of subrepresentational global dynamics to undergird the sort of cognitive processing envisioned by the RWR ("Representations without Rules") conception of cognition. Robust softness at the representational level is likely to rest upon a form of subrepresentational softness in which the causal links typically work collectively rather than singly, and in which the causal influence of individual links often gets overruled by the contrary influence of other links."

Siehe auch T. HORGAN / J. TIENSON: A Non-Classical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. P. 334.

407 S. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Rules and Representations. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1999. P. 726 – T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43, v.a. P. 28.

408 Einen eingehenderen Überblick über die verschiedenen Klassen von (Architektur-)Modellen im Konnektionismus findet man z.B. in A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 76-79 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 21-23 – G.D. REY / K.F. WENDER: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 59-60.

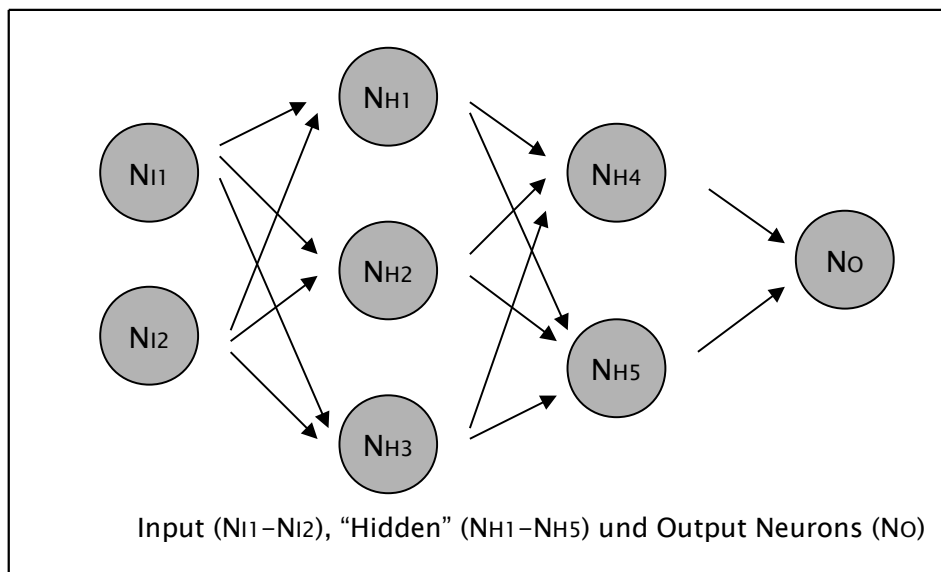
S. auch M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. PP. 24-26.

409 Grundlegend s. z.B. Fr. ROSENBLATT: The Perceptron. A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. Psychological Reviews. Vol. 65. 1958. PP. 386-408 (Reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): Neurocomputing: Foundations of Research. Chap. 8. MIT Press. Cambridge/MA. 1988. PP. 92-114).

S. auch M. MINSKY / S. PAPER: Perceptrons. MIT Press. Cambridge/MA. 1969. PP. 1-20, 73 (Reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): Neurocomputing: Foundations of Research. Chap. 13. MIT Press. Cambridge/MA. 1988. PP. 161-70).

Einführend s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 117-55, 156-255 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 97-103 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 51-72 – M. KÖHLE: Neu-

mungsvorgangs dar, wobei es – im Fall eines erweiterten mehrschichtigen Netzes – der Klasse der sog. “(Multilayer) Feedforward Architectures” angehört, d.h., der Informationsverarbeitungsfluß bewegt sich nur vorwärtsgerichtet in eine Richtung von den sog. „Eingabeneuronen“ (engl. “input neurons”) über die sog. „verdeckten Neuronen“ (engl. “hidden neurons”), die über die Veränderung ihrer Verbindungsgewichte die eigentliche Informationsverarbeitung leisten, zu den sog. „Ausgabeneuronen“ (engl. “output neurons”), sodaß die Aktivitäten der Neuronen einer Schicht nur die Aktivitäten der Neuronen der darauffolgenden Schicht beeinflussen können (s. Graphik.14).



Graphik.14: Schematisches Diagramm einer mehrschichtigen (engl. “multilayer”) “Feedforward Architecture” (angelehnt an A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 79, 98).

2.25.02 SIMPLE RECURRENT NETWORK NACH J.L. ELMAN

Das vom U.S.-amerikanischen Linguisten Jeffrey L. ELMAN entworfene sog. “Simple Recurrent Network (SRN)”⁴¹⁰ stellt ein abstraktes Schema des dyna-

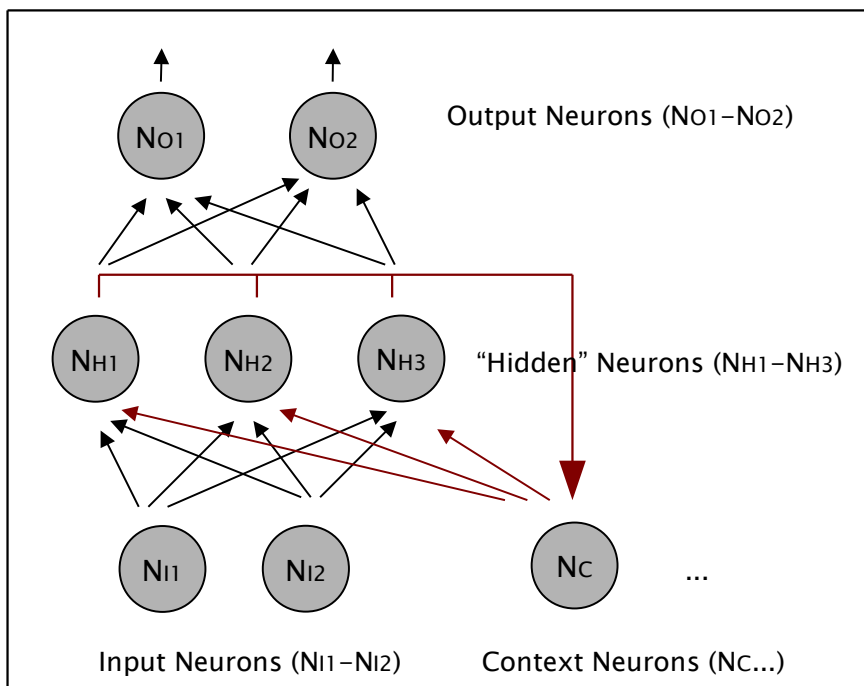
rale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 23-29 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 17-36 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 46-47, 52-62.

S. auch H. RITTER / Th. MARTINETZ / KI. SCHULTEN: Neural Computation and Self-Organizing Maps: An Introduction. Addison-Wesley. Reading/MA. 1992. PP. 27-32 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 269-72.

410 Grundlegend s. z.B. J.L. ELMAN: Finding Structure in Time. Cognitive Science. Vol. 14. 1990. PP. 179- 211.

Einführend s. z.B. G.D. REY / K.F. WENDER: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 66-67 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 137-38, 140-43 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 733-36.

mischen (Arbeits-)Gedächtnisses dar, wobei es der Klasse der sog. "(Partial) Recurrent Architectures" angehört, d.h., es zeichnet sich – im Vergleich zu den Feedforward Architectures – durch einen zusätzlichen rekurrenten, d.h. rückgekoppelten, Informationsverarbeitungsfluß von jeweils einem verdeckten Neuron zu einem sog. „Kontextneuron“ (engl. "context neuron") aus (s. Graphik.15: dargestellt als rote Pfeile). Diese Kontextneuronen speichern also i.S. einer exakten „Kopie“⁴¹¹ die Aktivierungen der betreffenden verdeckten Neuronen, die die Information über das vorangegangene (Eingabe-)Muster enthalten. Zum Zeitpunkt der Verarbeitung des nächsten (Eingabe-)Musters durch die verdeckten Neuronen erhalten diese nun zusätzlich auch die Aktivierungen der Kontextneuronen mit der Information über das vorangegangene (Eingabe-)Muster, sodaß ein zeitlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Mustern hergestellt werden kann, und damit eine interne abstrakte Repräsentation einer dynamischen Information in der Zeit in den verdeckten Neuronen kodiert werden kann.



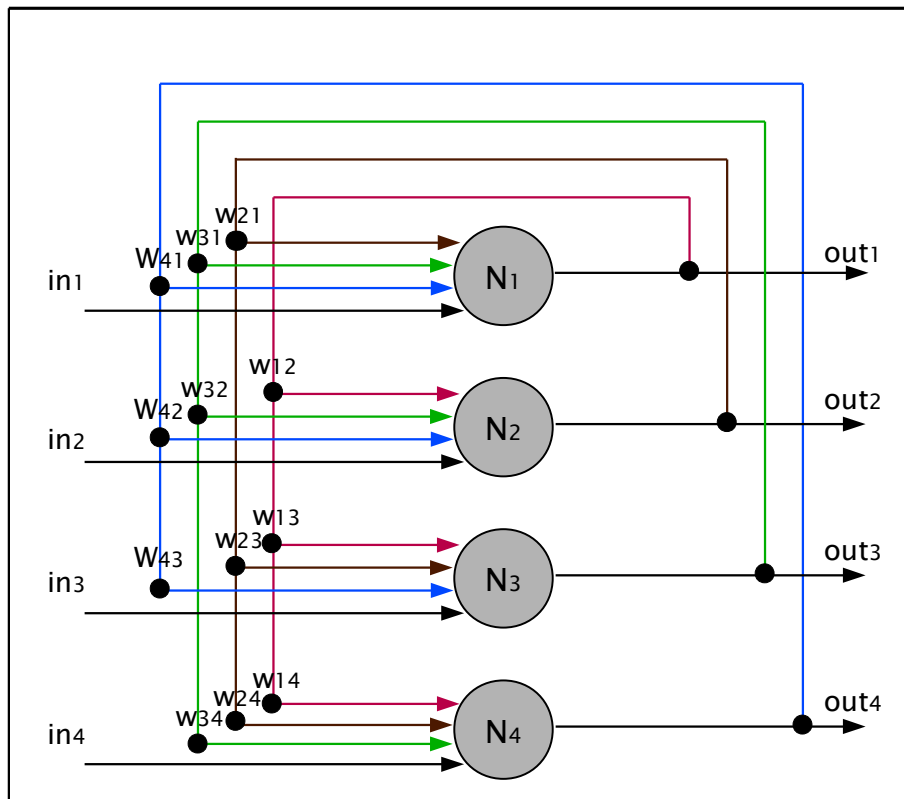
Graphik.15: Schematisches Diagramm eines "Simple Recurrent Network" (angelehnt an G.D. REY / K.F. WENDER: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 67).

S. auch M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. PP. 38-43 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 286-88 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 178-90.

411 Die Kontextneuronen besitzen die Identitätsfunktion als Aktivierungsfunktion.

2.25.03 HOPFIELD NETWORK NACH J.J. HOPFIELD UND LINEAR ASSOCIATOR MODEL NACH J.A. ANDERSON

Das vom U.S.-amerikanischen Physiker John J. HOPFIELD entwickelte gleichnamige sog. "HOPFIELD Network"⁴¹² stellt ein abstraktes Schema des dynamischen (auto-)assoziativen (Langzeit-)Gedächtnisses (engl. "auto-associa-



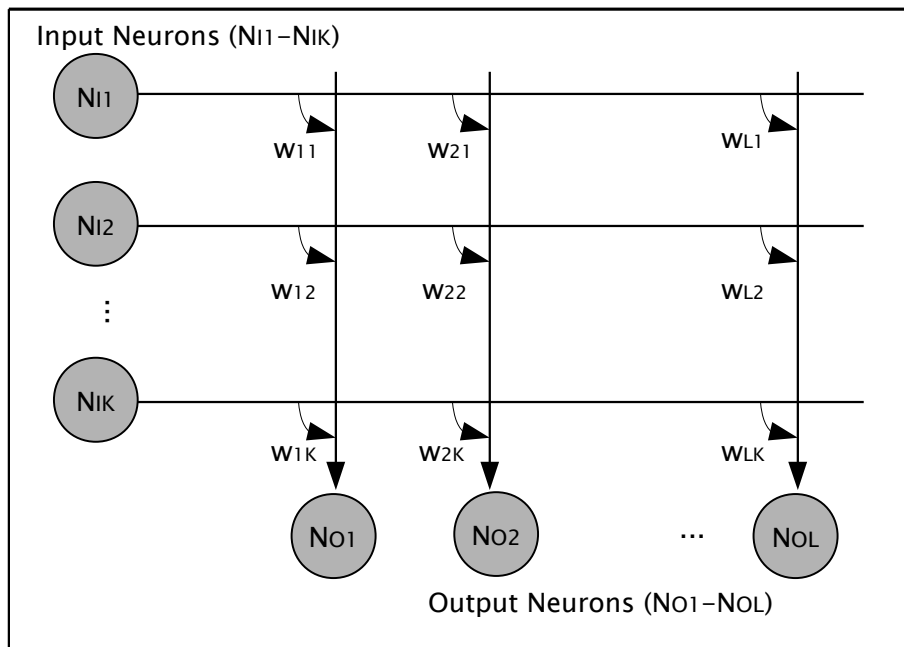
Graphik.16: Schematisches Diagramm eines HOPFIELD Network mit vier Neuronen, wobei

412 Grundlegend s. z.B. J.J. HOPFIELD: Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Properties. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 79. 1982. PP. 2554-58.
Einführend s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 197-206 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 282-96 – S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 680-703 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 113-59 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 201-208, 209-30 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 134-41 – A. SCHERER: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 125-34 – G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010. PP. 371-73.
S. auch G.W. COTTRELL: Attractor Networks. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 254-56 – H. RITTER / Th. MARTINETZ / KI. SCHULTEN: Neural Computation and Self-Organizing Maps: An Introduction. Addison-Wesley. Reading/MA. 1992. PP. 45-51 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 301-306.

jedes der Neuronen zwar mit allen anderen Neuronen, aber nicht mit sich selbst verbunden ist (angelehnt an A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 198).

tive memory”) dar, wobei es der Klasse der sog. “(Total) Recurrent Architectures” angehört (s. Graphik.16).

Ein abstraktes Schema eines dynamischen (hetero-)assoziativen (Langzeit-)Gedächtnisses (engl. “hetero-associative memory”) stellt das vom U.S.-amerikanischen Physiologen, Neuro- und Kognitionswissenschaftler James A. ANDERSON entworfene Modell des sog. „Linearen Assoziators“ (engl. “Linear Associator Model”)⁴¹³ dar (s. Graphik.17), bestehend aus einer Schicht mit Eingabeneuronen und einer Schicht mit Ausgabeneuronen, die über Verbindungsgewichte $w_{11} \dots w_{LK}$ miteinander assoziiert sind, sodaß z.B.



Graphik.17: Schematisches Diagramm eines Linear Associator Model (angelehnt an P. SMITH CHURCHLAND / T.J. SEJNOWSKI: The Computational Brain. MIT Press. Cambridge/MA. 1992. P. 79).

413 Grundlegend s. z.B. J.A. ANDERSON: A Simple Neural Network Generating an Interactive Memory. Mathematical Biosciences. Vol. 14. 1972. PP. 197-230 – G.E. HINTON / J.A. ANDERSON (Eds.): Parallel Models of Associative Memory. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1981.

Eingehend J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 33-40.

Einführend s. z.B. R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag, Berlin u.a. 1993. S. 251-76 – G.D. REY / K.F. WENDER: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 61-64 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin u.a. 1998. S. 144-51 – P. SMITH CHURCHLAND / T.J. SEJNOWSKI: The Computational Brain. MIT Press. Cambridge/MA. 1992. PP. 82-96.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.1.01.222.

anhand der HEBB'schen Lernregel (Gedächtnis-)Muster anhand der Anpassung der Verbindungsgewichte an vorgegebene Reize gespeichert werden können.

2.26 KLASSISCHE ARCHITEKTUREN IM (NEO-)KONNEKTIONISMUS

Es werden nun die bedeutendsten klassischen Architekturen im (frühen) (Neo-)Konnektionismus, die zwischen der Mitte der achtziger bis zur Mitte der neunziger Jahre des 20. Jhdts. entwickelt worden waren, kurz aufgelistet⁴¹⁴:

- (1) das "Recursive Auto-Associative Memory (RAAM)" nach J. POLLAK⁴¹⁵,
- (2) das "Reduced Descriptions" nach G.E. HINTON⁴¹⁶,
- (3) die "Boltzman Machine" nach G.E. HINTON / T. SEJNOWSKI / D.H. ACKLEY⁴¹⁷,
- (4) das "Distributed Connectionist Production System (DCPS)" nach D.S. TOURETZKY und G.E. HINTON⁴¹⁸,
- (5) das "BoltzCONS system" nach D.S. TOURETZKY⁴¹⁹ und das "DUCS system" nach D.S. TOURETZKY und S. GEVA⁴²⁰,
- (6) das "NETtalk" nach T.J. SEJNOWSKI und Ch. ROSENBERG⁴²¹,
- (7) das "Past Tense Learning Model" nach D.E. RUMELHART und J.L. McCLELLAND⁴²²,
- (8) das "TRACE model" nach J.L. McCLELLAND und J.L. ELMAN⁴²³,
- (9) das "μKLONE" nach M. DERTHICK⁴²⁴, und

414 S. hierzu im einzelnen z.B. M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. PP. 23-58 – T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 18-62.

415 S. z.B. J.B. POLLACK: Recursive Distributed Representations. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 77-105

416 S. z.B. G.E. HINTON: Mapping Part-Whole Hierarchies into Connectionist Networks. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 47-76.

417 S. z.B. D.H. ACKLEY / G.E. HINTON / T.J. SEJNOWSKI: A Learning Algorithm for Boltzman Machines. Cognitive Science. Vol. 9. 1985. PP. 147-69.

418 S. z.B. D.S. TOURETZKY / G.E. HINTON: A Distributed Connectionist Production System. Cognitive Science. Vol. 12. 1988. PP. 423-66.

419 S. z.B. D.S. TOURETZKY: BoltzCONS: Reconciling Connectionism with the Recursive Nature of Stacks and Trees. Proceedings of the Eighth Conference of the Cognitive Science Society. 15-17 August 1986. Amherst/MA. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1986. PP. 522-30.

420 S. z.B. D.S. TOURETZKY / Sh. GEVA: A Distributed Connectionist Representation for Concept Structures. Technical Report. Computer Science Department. Paper 1935. 1987. PP. 1-10.

421 S. z.B. T.J. SEJNOWSKI / Ch. ROSENBERG: NETtalk: A Parallel Network that Learns to Read aloud. Technical Report 86-01. Department of Electrical Engineering and Computer Science. Johns Hopkins University. Baltimore/MD. 1986.

422 S. z.B. D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND: On Learning the Past Tenses of English Verbs. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 216-71.

423 S. z.B. J.L. McCLELLAND / J.L. ELMAN: The TRACE Model of Speech Perception. Cognitive Psychology. Vol. 18. 1986. PP. 1-86.

424 S. z.B. M. DERTHICK: Mundane Reasoning by Settling on a Plausible Model. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 107-58.

(10) die "Connectionist Sequential Machine" M.I. JORDAN⁴²⁵.

2.27 KONNEKTIONISMUS UND DYNAMISCHE SYSTEMTHEORIE

2.27.1 Bezugnehmend auf die Position der methodologischen Analyse i.S. D. MARR's in der Kognitionswissenschaft⁴²⁶, wird – im Rahmen der algorithmischen Analyseebene – das mathematische Modell eines künstlichen neuronalen Netzwerks⁴²⁷ im Sinne der Theorie der (nichtlinearen) Dynamischen Systeme analysiert⁴²⁸, indem die Aktivierungs- und Propagierungsfunktionen sowie die Lernregeln als Transformationsfunktionen, und die Aktivierungswerte der technischen Neuronen bzw. die Verbindungsgewichte der technischen Synapsen als (Zustands-)Vektoren eines n -dimensionalen (System-)Zustandsraums betrachtet werden können, die – mit der Zeit als Iterationsindex – im Wege einer internen selbstorganisierten (System-)Dynamik stabile asymptotische (System-)Zustände in Form von Attraktoren ausbilden können⁴²⁹, worauf eine Vielzahl von Autoren im Konnektionismus hinweisen⁴³⁰, z.B. P. SMOLENSKY⁴³¹, J.F. ELMAN⁴³², J. PETITOT⁴³³, Wh. TABOR⁴³⁴, M.S.C. THOMAS et al.⁴³⁵, Fr. PASEMANN⁴³⁶,

425 S. z.B. M.I. JORDAN: Attractor Dynamics and Parallelism in a Connectionist Sequential Machine. In: Proceedings of the Eighth Annual Cognitive Science Society Conference. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1986. PP. 531-46.

426 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 1.13, 1.20.

427 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 2.211.

428 S. z.B. B. KOSKO: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992. PP. 14-17.

S. auch die Ausführungen in Kpt. 1.20, Fn. 41, 2.23.

429 S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 1.221, 1.222, 5.2.

430 S. auch neben den Konnektionisten z.B. H. LEITGEB: Interpreted Dynamical Systems and Qualitative Laws: From Neural Network to Evolutionary Systems. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 189-202, v.a. P. 197, der von "stable (resonant, equilibrium) states" spricht.

431 S. z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 1-23, v.a. PP. 4-7.

432 S. z.B. J.L. ELMAN: Connectionism, Artificial Life, and Dynamical Systems. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA. Oxford/UK. 1998. PP. 488-505, v.a. PP. 501-504 – J.L. ELMAN / E.A. BATES / M.H. JOHNSON / A. KARMILOFFSMITH / D. PARISI / K. PLUNKETT: Rethinking Innateness. A Connectionist Perspective on Development. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 210-19, 219-27 – J.L. ELMAN: Connectionist Models of Cognitive Development: Where Next? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 9. 2005. PP. 111-17.

433 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 175-83.

434 S. z.B. Wh. TABOR: Dynamical Insight into Structure in Connectionist Models. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 165-66.

435 S. z.B. M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND / F.M. RICHARDSON / A.C. SCHAPIRO / Fr.D. BAUGHMAN: Dynamic and Connectionist Approaches to Development: Toward a Future of Mutually Beneficial Coevolution. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 337-53.

436 S. z.B. Fr. PASEMANN: Neuromodules: A Dynamical Systems Approach to Brain Modelling. In: H.J. HERRMANN / D.E. WOLF / E. PÖPPEL (Eds.): Workshop on Supercomputing in Brain Research. From Tomography to Neural Networks. HLRZ, KFA Jülich, Germany, November 21-23, 1994. World

KI. MAINZER⁴³⁷, W. BECHTEL und A.A. ABRAHAMSEN⁴³⁸, T. HORGAN und J. TIENSON⁴³⁹.

2.27.2 Nicht nur von Seiten der Neuroinformatik und des Konnektionismus⁴⁴⁰, sondern in letzter Zeit wird – vor allem über die Entwicklungspsychologie – zunehmend auch der Versuch unternommen⁴⁴¹, die konnektionistischen Modelle mit dem Ansatz der Dynamischen Systemtheorie zu verschmelzen, z.B. von den U.S.-amerikanischen Entwicklungspsychologinnen Esther THELEN und Linda B. SMITH mit ihrem seit den neunziger Jahren des 20. Jhdt.'s entwickelten sog. "Dynamic Systems Approach"⁴⁴², und dem daran anknüpfenden sog. "Dynamic Field Approach"⁴⁴³ des U.S.-amerikanischen Psychologen John P.

Scientific Publishing Co. Singapore. 1995. PP. 3-4.

437 Siehe Kap. 6.15.08.

438 Siehe Kap. 6.15.02.

439 Siehe Kap. 6.15.03.

440 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 4.3, 4.4, 5.1, 5.2, 5.3, 6.

441 S. z.B. J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009.

Einen Überblick hierzu geben z.B. J.L. McCLELLAND / G. VALLABHA: *Connectionist Models of Development: Mechanistic Dynamical Models with Emergent Dynamical Properties*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 3-24 und Gr. SCHÖNER: *Development as Change of Systems Dynamics: Stability, Instability, and Emergence*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 25-47.

442 Grundlegend s. z.B. E. THELEN / L.B. SMITH: *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. MIT Press. Cambridge/MA. 1993.

Eingehend s. z.B. E. THELEN / E. BATES: *Connectionism and Dynamic Systems: Are they Really Different?* *Development Science*. Vol. 6. 2003. PP. 378-91 – E. THELEN: *Time-Scale Dynamics and the Development of an Embodied Cognition*. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): *Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition*. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 69-100 – L.B. SMITH / L.K. SAMUELSON: *Different is Good: Connectionism and Dynamic Systems Theory are Complementary Emergentist Approaches to Development*. *Developmental Science*. Vol. 6. 2003. PP. 434-39.

Einführend s. z.B. E. THELEN / L.B. SMITH: *Dynamic Systems Theories*. In: W. DAMON / R.M. LERNER: *Handbook of Child Psychology*. Vol. 1: *Theoretical Models of Human Development*. 6th Ed. Chap. 6. 2006. PP. 258-312 – W. WICKI: *Entwicklungspsychologie*. Ernst Reinhardt Verlag. München, Basel. 2010. S. 17-18 – Fr. PETERMANN / K. NIEBANK / H. SCHEITHAUER: *Entwicklungswissenschaft. Entwicklungspsychologie – Genetik – Neuropsychologie*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2004. S. 261-66.

443 Eingehend s. z.B. J.P. SPENCER / Gr. SCHÖNER: *Bridging the Representational Gap in the Dynamic Systems Approach to Development*. *Development Science*. Vol. 6. 2003. PP. 392-412 – J.P. SPENCER / S. PERONE / J.S. JOHNSON: *The Dynamic Field Theory and Embodied Cognitive Dynamics*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 86-118 – J.P. SPENCER / E. DINEVA / Gr. SCHÖNER: *Moving toward a Unified Theory While Valuing the Importance of the Initial Conditions*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 354-72 – J.S. JOHNSON / J.P. SPENCER / Gr. SCHÖNER: *A Layered Neural Architecture for the Consolidation, Maintenance, and Updating of Representations in Visual Working Memory*. *Brain Research*. Vol. 1299. 2009. PP. 17-32.

SPENCER und des theoretischen Physikers und Neuroinformatikers Gregor SCHÖNER.

2.27.3 Ferner wird eine Annäherung von der Dynamischen Systemtheorie und dem Konnektionismus über die sog. „Evolutionäre Robotik“ (engl. “Evolutionary Robotics”)⁴⁴⁴ und die sog. „Entwicklungsrobotik“ (engl. “Developmental Robotics”)⁴⁴⁵ in Verbindung mit der mathematischen Methode der sog. „Evolutionären Komputation“ (engl. “Evolutionary Computation (EC)”)⁴⁴⁶ vorgenommen, z.B. von dem U.S.-amerikanischen (Entwicklungs-)Psychologen Matthew SCHLESINGER⁴⁴⁷.

2.28 POSITIVE MOTIVE FÜR DEN KONNEKTIONISMUS

2.280 Der Hauptvorteil des konnektionistischen Paradigmas besteht im Argument der sog. „neuralen Plausibilität“ (engl. “neural plausibility”) bzw. der sog.

Einführend s. z.B. Gr. SCHÖNER: Development as Change of Systems Dynamics: Stability, Instability, and Emergence. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 31-37 – Gr. SCHÖNER: Dynamical Systems Approaches to Cognition. In: R. SUN (Ed.): The Cambridge Handbook of Computational Psychology. Cambridge University Press. Cambridge. 2008. PP. 101-26, v.a. PP. 109-116.

Einführend s. z.B. Fr. CALVO GARZÓN: Towards a General Theory of Antirepresentationalism. British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 59. 2008. PP. 264-72.

444 Einführend hierzu s. z.B. S. NOLFI / D. FLOREANO: Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines. MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 2001 – M. SCHLESINGER: The Robot as a New Frontier for Connectionism and Dynamic Systems Theory. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 190-91.

445 Einführend hierzu s. z.B. M. LUNGARELLA / G. METTA / R. PFEIFER / G. SANDINI: Developmental Robotics: A Survey. Connection Science. Vol. 15. 2003. PP. 151-90 – J. WENG / J. McCLELLAND / A. PENTLAND / O. SPORNS / I. STOCKMANN / M. SUR: Artificial Intelligence: Autonomous Mental Development by Robots and Animals. Science. Vol. 291. 2001. PP. 599-600 – M. SCHLESINGER: The Robot as a New Frontier for Connectionism and Dynamic Systems Theory. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 189-90.

446 Einführend hierzu s. z.B. J. WILES / J. HALLINAN (Eds.): Evolutionary Computation and Cognitive Science: Modeling Evolution and Evolving Models. In: D.B. FOGEL / C.J. ROBINSON (Eds.): Computational Intelligence: The Experts Speak. IEEE Press. San Diego. 2003. PP. 179-89, v.a. PP. 183-84, 184-88 – M. SCHLESINGER: Evolving Agents as a Metaphor for the Developing Child. Developmental Science. Vol. 7. 2004. PP. 158-59.

447 Eingehend s. z.B. M. SCHLESINGER / D. PARISI: The Agent-Based Approach: A New Direction for Computational Models of Development. Developmental Review. Vol. 21. 2001. PP. 121-46 – M. SCHLESINGER: A Lesson from Robotics: Modeling Infants as Autonomous Agents. Adaptive Behavior. Vol. 11. 2003. PP. 97-107 – M. SCHLESINGER: Evolving Agents as a Metaphor for the Developing Child. Developmental Science. Vol. 7. 2004. PP. 154-68.

Einführend s. z.B. M. SCHLESINGER: The Robot as a New Frontier for Connectionism and Dynamic Systems Theory. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 182-99 – M. SCHLESINGER / D. PARISI: Connectionism in an Artificial Life Perspective: Simulating Motor, Cognitive, and Language Development. In: D. MARESCHAL et al. (Eds.): Neuroconstructivism. 2. Perspectives and Prospects. Oxford University Press. Oxford. 2007. PP. 129-58.

„biologischen und psychologischen Plausibilität“ (engl. “biological and psychological plausibility”)⁴⁴⁸, d.h. insbesondere die bereits angesprochene „induktiv“ fallbezogene und nicht „deduktiv“ regelbeherrschte oder regelgesteuerte Informationsverarbeitung von künstlichen neuronalen Netzwerken deckt sich sehr viel besser mit dem Lernverhalten des menschlichen Gehirns, m.a.W. man kann eine unbestreitbar hohe strukturelle und funktionale Äquivalenz der Leistungen einiger konnektionistischer (Architektur-)Modelle mit kognitiven Leistungen des Menschen feststellen. Dieses Argument wird deshalb nach der h.M.⁴⁴⁹ in der Literatur als eine wesentliche Rechtfertigung für den Konnektionismus ausgegeben, und anhand der im folgenden kurz darzulegenden positiven Haupteigenschaften⁴⁵⁰ von künstlichen neuronalen Netzwerken untermauert:

448 Eingehend s. hierzu z.B. M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. PP. 28-30 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 45-46 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 56 – G. DORFFNER: Radical Connectionism – a Neural Bottom-Up Approach to AI. In: G. DORFFNER (Ed.): Neural Networks and a New Artificial Intelligence. International Thomson Computer Press. London, Boston. 1997. P. 96.

Einführend s. z.B. P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 126-28.

Einschränkend s. z.B. M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. P. 29 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 341-46 – A. CLARK: Mindware. An Introduction to the Philosophy of Cognitive Science. Oxford Univ. Press. New York, Oxford. 2001. PP. 79-82 – I.S.N. BERKELEY: Some Myths of Connectionism. From: <http://www.ucs.louisiana.edu/~isb9112/dept/phil341/myths.myths.html>. PP. 1-14.

449 S. J.A. BARNDEN / M. CHADY: Artificial Intelligence and Neural Networks. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 113-14 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 56-65 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 333-37 – G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“

KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 79-83 – G. DORFFNER: Radical Connectionism – a Neural Bottom-Up Approach to AI: In: G. DORFFNER (Ed.): Neural Networks and a New Artificial Intelligence. International Thomson Computer Press. London, Boston. 1997. PP. 93-97, 122-23 – G. HELM: Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1991 S. 70, 111-12 – J. KELLER: Konnektionismus – ein neues Paradigma zur Wissensrepräsentation? Linguistische Berichte. Bd. 128. 1990. S. 306-307.

Eine sehr gute Zusammenfassung, der in dieser Darlegung im wesentlichen gefolgt wird, findet sich bei M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 144-45, 184-96, 215-16.

450 Hier seien nur die wichtigsten Hauptmerkmale aufgezählt; für eine erschöpfende Behandlung sei auf die Texte in Fn. 311 verwiesen.

Desweiteren wird die Eigenschaft des sog. “Parallel Soft Constraint Satisfaction” im Detail in Kap. 4.22 erörtert.

2.281 DYNAMISCHE, SELBSTORGANISIERENDE UND ADAPTIVE LERNFÄHIGKEIT

Im Gegensatz zu den klassisch symbolischen KI-Systemen funktioniert ein konnektionistisches Netzwerk ohne eine externe globale Kontrollfunktion⁴⁵¹ mit Ausnahme einer vorgegebenen Menge an Eingabedaten und der zielgerichteten Bereitstellung von Ausgabedaten im Rahmen eines überwachten Lernverfahrens (engl. "supervised learning"⁴⁵²), das gegenüber den symbolischen Systemen den unbestrittenen Vorteil bietet, das eigene Systemverhalten variabel, flexibel und adaptiv an die wechselnde Präsentation der Datenstrukturen anpassen zu können, während unüberwachte Lernverfahren (engl. "unsupervised learning") darüber hinaus das selbständige Erlernen einer Aufgabenstellung und eine angemessene Ableitung regelhaften Verhaltens ermöglichen (sog. „Selbstorganisation“ (engl. "self-organization"))⁴⁵³, m.a.W. ein Netzwerk „lernt aus Erfahrung“.

2.282 HOHER GRAD AN FEHLERTOLERANZ

Im Gegensatz zu den symbolischen KI-Systemen, die eine eindeutige, vollständige und fehlerfreie Dateneingabe bedingen, kann ein konnektionistisches Modell – wie auch der Mensch – mit „verrauschten“, unvollständigen, ungenauen, widersprüchlichen und sonstwie gestörten oder fehlerhaften Daten umgehen (engl. "resistance to noise"⁴⁵⁴), oder den Ausfall einzelner Verarbeitungseinheiten im Wege eines stetigen Leistungsabfalls ausgleichen, m.a.W. im Wege einer graduellen Kompensation liefert das Modell noch brauchbare Ergebnisse (engl. "graceful degradation"⁴⁵⁵).

2.283 DISTRIBUIERTE („HOLISTISCHE“) UND AKTIVE INFORMATIONSREPRÄSENTATION MIT EINER MASSIV PARALLELEN INFORMATIONSVERARBEITUNG

Während in den symbolischen KI-Systemen eine aktive Komponente, das Programm, auf eine passive Repräsentation, die Daten, zugreift, verfügt ein konnektionistisches Modell über eine aktive Repräsentation, die am Informationsverarbeitungsprozeß direkt beteiligt ist, indem sich das Gesamtaktivierungsmuster des Netzwerkes ständig parallel und kontinuierlich aufgrund der gleichzeitigen und gegenseitigen Beeinflussung der Netzwerkeinheiten über gewichtete und gerichtete Verbindungen verändert, in denen das „Wis-

451 Selbstverständlich hat man jedoch noch die Systemparameter, wie z.B. die Lernrate, und die Netzarchitektur eines künstlichen neuronalen Netzwerks – „von außen“ – zu justieren.

452 S. Kap. 2.213.

453 S. hierzu Kap. 1.23, 4.4.01, 4.4.02.

454 S. z.B. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 20-29.

455 S. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 29.

sen⁴⁵⁶ verteilt gespeichert ist: Das gesamte Netzwerk ist die Wissens- oder Informationsstruktur⁴⁵⁷, weshalb bei Ausfall von einzelnen Verarbeitungseinheiten eine geringe Störanfälligkeit erreicht wird, und ist aktiv an der Dateninterpretation beteiligt.

2.284 ASSOZIATIVE, KLASSIFIZIERENDE UND GENERALISIERENDE SPEICHERUNG VON INFORMATIONEN MIT „HYPOTHESEN-BILDUNG“ UND „-PRÜFUNG“

Im Gegensatz zu den symbolischen KI-Systemen, die eine Information adressorientiert ablegen und aufrufen, werden Informationen in einem konnektionistischen Modell inhaltsbezogen (engl. "content-addressable memory"⁴⁵⁸, "content-based access"⁴⁵⁹) bzw. assoziativ (engl. "associative access"⁴⁶⁰) gespeichert, weshalb es die Leistung erwirbt, ein gegebenes Eingabemuster auf ein entsprechendes Ausgabemuster „abzubilden“, wobei entweder das Eingabe- und das zu erzeugende Ausgabemuster identisch (sog. „Autoassoziation“ (engl. "auto-association")) oder voneinander verschieden (sog. „Heteroassoziation“ (engl. "hetero-association")) sind: Letztere werden zur Simulation von Kategorisierungs-, Generalisierungs- und Inferenzleistungen sowie zur „Hypothesenbildung“ und „Hypothesenprüfung“ verwendet (engl. "default assignment", "spontaneous generalization"), erstere zur Mustererkennung und -vervollständigung (engl. "completion task") sowie zur Fehlerkorrektur.⁴⁶¹

456 S. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 31-40.

S. auch z.B. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 144 – G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 79.

457 S. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 10.

458 S. z.B. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 25-29.

S. auch W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. P. 62.

459 S. z.B. J.A. BARNDEN / M. CHADY: Artificial Intelligence and Neural Networks. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 114.

460 S. Fn. 359.

461 S. J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 18-31, v.a. PP. 21, 27.

2.29 KRITIK AM KONNEKTIONISMUS

Im Rahmen der sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. “symbolism vs. connectionism debate”)⁴⁶² ist in der Literatur⁴⁶³ nun ebenfalls vielfach heftige generelle Kritik von den Symbolisten am Konnektionismus bzw. an den Modellen der konnektionistischen Künstlichen Intelligenz geübt worden⁴⁶⁴, weshalb an dieser Stelle zumindest in Kürze die wichtigsten Argumente erwähnt werden:

1. die unzureichende Erklärung von Kognition auf Grund des Fehlens einer kombinatorischen Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen und von struktursensitiven Prozessen in konnektionistischen Modellen,
2. die schwere „Kontrollierbarkeit“ von komplexen künstlichen neuronalen Netzen auf Grund ihrer mangelnden Transparenz,
3. die Langsamkeit der meisten gängigen konnektionistischen Lernverfahren,
4. die unzureichende Leistung bei der Realisation von logischen sequentiellen Inferenzen,
5. die Eingeschränktheit von konnektionistischen Modellen auf eng umgrenzte kognitive Leistungen und die Vorauswahl des bereits aufbereiteten Datenmaterials im Rahmen einer vom Experimentator wohldefinierten Aufgabenstellung,
6. die mangelnde Größe der konnektionistischen Netzarchitektur und deren abstrakte Distanz zu biologischen neuronalen Netzen,
7. die Unfähigkeit von künstlichen neuronalen Netzen bestimmte Daten zu lernen oder die Überlagerung von bereits gelernten Mustern während des erneuten Lernvorgangs (engl. “catastrophic forgetting”⁴⁶⁵) und

462 Eingehend hierzu s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 4.1, 4.11-4.15. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

463 Einen Überblick hierzu bieten z.B. Chr. ELIASMITH / W. BECHTEL: Symbolic versus Subsymbolic. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 292 – R. MANGOLD: Die Simulation von Lernprozessen konnektionistischen Netzwerken. In: N. BIRBAUMER et al. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Ser. 2: Kognition. Bd. 7: Lernen. Hogrefe. Göttingen u.a. 1996. S. 437-39 – A. CLARK: Mindware. An Introduction to the Philosophy of Cognitive Science. Oxford Univ. Press. New York, Oxford. 2001. PP. 79-82 – I.S.N. BERKELEY: Some Myths of Connectionism. From: <http://www.ucslouisiana.edu/~isb9112/dept/phil341/myths.myths.html>. PP. 1-14 – Ph.T. QUINLAN: Connectionism and Psychology: A Psychological Perspective on New Connectionist Research. Harvester Wheatsheaf. New York u.a. 1991. PP. 238-66 – M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 145-46. S. auch W.J.M. LEVELT: Die konnektionistische Mode. Sprache & Kognition. Vol. 10. 1991. S. 61-72 – G. STRUBE: Neokonnektionismus: Eine neue Basis für die Theorie und Modellierung menschlicher Kognition. Psychologische Rundschau. Bd. 41. 1990. S. 129-43 – M. McCLOSKEY: Networks and Theories: The Place of Connectionism in Cognitive Science. Psychological Science. Vol. 2. 1991. PP. 387-95.

464 S. eingehend H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

465 S. z.B. R.M. FRENCH: Catastrophic Forgetting in Connectionist Networks. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo.

8. die nur eingeschränkte Generalisierungsleistung von konnektionistischen Modellen.

3. INTEGRATIVE MECHANISMEN UND MODELLE IN DEN KOGNITIVEN NEUROWISSENSCHAFTEN

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden vorab ein sehr kurzer einführender Überblick über die experimentellen Methoden und Techniken in den kognitiven Neurowissenschaften gegeben (Kap. 3.1), da im späteren Verlauf der Arbeit (Kap. 3.3 und 3.4), vor allem bei der Darstellung der diversen empirisch-experimentellen Modelle und der entsprechenden (Synchronisations-)Mechanismen zur Lösung des (allgemeinen) Bindungsproblems in den Neuro- und Kognitionswissenschaften, darauf Bezug genommen wird. Danach wird auf die methodischen Prinzipien und Schemata der neuronalen Kodierung in den kognitiven Neurowissenschaften eingegangen (Kap. 3.2), insbesondere auf die Schemata der temporalen und der Populationskodierung, die der temporalen Synchronisationshypothese zu Grunde liegen, wonach präzise temporale Korrelationen zwischen den Impulsen von Neuronen und Stimulus-abhängige temporale Synchronisationen der kohärenten Aktivität von neuronalen Populationen, den Assemblies, dazu beitragen, daß das (allgemeine) Bindungsproblem gelöst wird. Im Anschluß daran werden daher, nachdem das allgemeine Bindungsproblem in den kognitiven Neurowissenschaften erläutert worden ist (Kap. 3.30), die wichtigsten empirisch-experimentellen Modelle in der Wahrnehmungs- und kognitiven (Neuro-)Psychologie, in der medizinischen Neurophysiologie und in der kognitiven Neurobiologie vorgestellt, wobei die dynamischen (Bindungs-)Modelle im Vordergrund stehen, d.h. diejenigen Ansätze, die von der Annahme von temporalen integrativen (Synchronisations-)Mechanismen zur Lösung des Bindungsproblems ausgehen anhand der temporalen Synchronisation von neuronaler (Phasen-)Aktivität einer Population von Neuronen, basierend auf den dynamischen, selbstorganisierenden Prozessen in den entsprechenden neuronalen Netzwerken (Kap. 3.31-3.34). Abschließend wird dann noch die (Merkmals-)Bindung bzw. die integrativen neuronalen (Synchronisations-)Mechanismen in der visuellen Perzeption näher untersucht, u.z. Bezug nehmend auf die Binding-by-Synchrony Hypothese nach W. Singer, A.K. Engel und P. König et al. in der Neurophysiologie, die das Bindungsproblem mit Bezug auf die visuelle Informationsverarbeitung im Rahmen der integrativen (Synchronisations-)Mechanismen in der visuellen Szenenanalyse thematisiert (Kap. 3.4).

3.1 EXPERIMENTELLE METHODEN UND TECHNIKEN IN DEN (KOGNITIVEN) NEUROWISSENSCHAFTEN

3.10 In den sog. „(kognitiven) Neurowissenschaften“ (engl. “(cognitive) neurosciences”) sind seit den siebziger Jahren des 20. Jhdts eine Vielzahl von experimentellen Methoden und Techniken entwickelt worden, um empirische Daten über die Struktur und Funktionsweise des neuronalen Systems zu erhalten, weshalb nun ein kurzer einführender Überblick darüber gegeben wird.⁴⁶⁶

3.11 Die Methoden der (tier-)experimentellen Elektrophysiologie (engl. “electrophysiology”)⁴⁶⁷ in der medizinischen Neurophysiologie beschreiben die elektrische Aktivität von Neuronen, indem mit (Mikro-)Elektroden (engl. “(micro-)electrodes”)⁴⁶⁸ die sog. „Aktionspotentiale“ (engl. “action potential”)⁴⁶⁹ von einzelnen Neuronen, zumeist extrazellulär, abgeleitet werden (engl. “single-cell recording”)⁴⁷⁰, oder simultan die aufsummierten und gemittelten, extrazellulär registrierten Signale von mehreren Neuronen in Form von sog. „lokalen Feldpo-

-
- 466 Der Überblick orientiert sich dabei vor allem an M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 120-61 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 57-84 – Br. KOLB / I.Qu. WHISHAW: *Fundamentals of Human Neuropsychology*. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003. PP. 144-70 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 129-46 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: *Methoden der kognitiven Neurowissenschaften*. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 7-29 – D. MARESCHAL et al. (Eds.): *Neuroconstructivism*. 1. *How the Brain Constructs Cognition*. Oxford University Press. Oxford. 2007. PP. 49-68.
- 467 S. einleitend z.B. M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 120-25 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 64-66 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: *Methoden der kognitiven Neurowissenschaften*. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 26-28 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 145-46. Eingehend s. z.B. M. ABELES: *Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex*. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40, v.a. PP. 121-24.
- 468 S. hierzu z.B. M. ABELES: *Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex*. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40, v.a. PP. 121-24.
- 469 S. hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.211.
- 470 S. hierzu z.B. M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 28, 31-32, 120-25 – Br. KOLB / I.Qu. WHISHAW: *Fundamentals of Human Neuropsychology*. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003. PP. 146-50 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 85 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): *Principles of Neural Science*. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. P. 128 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: *Methoden der kognitiven Neurowissenschaften*. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. S. 28-30 – S.M. BREEDLOVE / M.R. ROSENZWEIG / N.V. WATSON (Eds.): *Biological Psychology. An Introduction to Behavioral, Cognitive, and Clinical Neuroscience*. 6th Ed. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2010. PP. 61-63.

tentialen“ (engl. “Local Field Potentials (LFP)”) ⁴⁷¹ (engl. “multiunit recording”). ⁴⁷²
3.12 Die Methoden der klinischen Elektrophysiologie (engl. “clinical electrophysiology”) ⁴⁷³ in der Neurologie sind die sog. „Elektroencephalographie (EEG)“ (engl. “Electroencephalography (EEG)”), die sog. „Elektroneurographie (ENG)“ (engl. “Electroneurography (ENG)”), die sog. „Elektromyographie (EMG)“ (engl. “Electromyography (EMG)”), die sog. „Magnetencephalographie (MEG)“ (engl. “Magnetoencephalography (MEG)”) und die Techniken der EEG- und MEG-Datenanalyse, die sog. „Ereigniskorrelierte Potentiale“ (engl. “Event-Related Potential (ERP)”).

3.13 Die wichtigsten Verfahren der bildgebenden Methoden (engl. “neuroimaging”) ⁴⁷⁴ sind die sog. „Computertomographie (CT)“ (engl. “Computed/Computerized Tomography (CT)”), die sog. „(funktionelle) Magnetresonanztomographie ((f)MRT)“ (engl. “(functional) Magnetic Resonance Imaging ((f)MRI)”), die sog. „Positronen-Emissions-Tomographie (PET)“ (engl. “Positron

471 S. hierzu eingehend z.B. J. CSICSVARI / D.A. HENZE / Br. JAMIESON / K.D. HARRIS / A. SIROTA / P. BARTHÓ / K.D. WISE / G. BUZSÁKI: Massively Parallel Recording of Unit and Local Field Potentials with Silicon-Based Electrodes. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 90. 2003. PP. 1314-23 – St. KATZNER / I. NAUHAUS / A. BENUCCI / V. BONIN / D.L. RINGACH / M. CARANDINI: Local Origin of Field Potentials in Visual Cortex. *Neuron*. Vol. 61. 2009. PP. 35-41 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / Ch.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 2. 1990. PP. 588-606.

S. hierzu einführend z.B. R. QUIAN QUIROGA / S. PANZERI: Extracting Information from Neural Populations: Information Theory and Decoding Approaches. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 10. 2009. PP. 173-85, v.a. PP. 174, 182.

472 S. hierzu z.B. M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. P. 125 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: Methoden der kognitiven Neurowissenschaften. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. S. 28-30.

Einen eingehenden Überblick über die statistischen Methoden der neuronalen Datenanalyse von Aktionspotentialsequenzen, sog. “spike trains”, bietet z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 456-61.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.20, v.a. Fn. 4.

473 S. einführend z.B. Br. KOLB / I.Qu. WHISHAW: *Fundamentals of Human Neuropsychology*. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003. PP. 150-57 – M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 148-52 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 66-72 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: Methoden der kognitiven Neurowissenschaften. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 22-24 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 136, 137-39 – St.L. BRESSLER: Event-Related Potentials. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 412-15.

474 S. einführend z.B. Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: Methoden der kognitiven Neurowissenschaften. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 7-22 – M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: *The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind*. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 130-33, 148-61 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 60-61, 73-83 – Br. KOLB / I.Qu. WHISHAW: *Fundamentals of Human Neuropsychology*. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003. PP. 160-71 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 131-35.

Emission Tomography (PET)“) und die sog. „Magnetresonanzspektroskopie (MRS)“ (engl. “Magnetic Resonance Spectroscopy (MRS)”).

3.14 Das wichtigste Verfahren der (Magnet- und Elektro-)Stimulationsmethoden⁴⁷⁵ ist die sog. „Transkranielle Magnetstimulation (TMS)“ (engl. “Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)”).

475 S. einführend z.B. M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 140-41, 145-48 – Chr. BÜCHEL / H.-O. KARNATH / P. THIER: Methoden der kognitiven Neurowissenschaften. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Aufl. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 25-26 – D. PURVES et al. (Eds.): Principles of Cognitive Neuroscience. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 62-64 – Br. KOLB / I.Qu. WHISHAW: Fundamentals of Human Neuropsychology. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003. P. 158 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: Biopsychologie. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 136, 144-45.

3.2 METHODISCHE PRINZIPIEN UND SCHEMATA DER NEURONALEN KODIERUNG IN DEN (KOGNITIVEN) NEUROWISSENSCHAFTEN

3.20 In den sog. „(kognitiven) Neurowissenschaften“ (engl. “(cognitive) neurosciences”) besteht eine der grundlegenden Fragestellungen darin, ausgehend von der (elektrischen) Aktivität eines Neurons in Form eines sog. „Aktionspotentials“ (engl. “action potential”, oder vereinfacht: “spike”)⁴⁷⁶ bzw. einer Sequenz von Aktionspotentialen (engl. “(neur(-on-)al) spike train”)⁴⁷⁷, worin der von den Neuronen verwendete (neuronale) Kode (engl. “(neuronal) code”) besteht, anhand dessen die (neuronale) Information im neuronalen System repräsentiert und transformiert wird, m.a.W. das Problem der sog. „neur(-on-)alen Kodierung“ (engl. “neur(-on-)al coding”)⁴⁷⁸, unter Einschluß der damit einhergehenden mathematischen Analyse, z.B. mit statistischen, wahrscheinlichkeitstheoretischen und stochastischen Methoden⁴⁷⁹, im Rahmen der „theoretischen und komputationalen Neurowissenschaft“ (engl. “theoretical and computational neuroscience”).⁴⁸⁰ Dabei wird in den Neurowissenschaften immer noch eine

-
- 476 Zum Begriff des sog. „Aktionspotentials“ (engl. “action potential”) s. z.B. L. SQUIRE et al. (Eds.): *Fundamental Neuroscience*. 3rd Ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam, Heidelberg. 2008. PP. 117-31 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 83-111 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL (Hrsg.): *Neurowissenschaften. Eine Einführung*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996 S. 167-84. Zum Begriff des “spike” (dt.: (kurzzeitige Spannungs-)Spitze) s. z.B. M. ABELES: *Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex*. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. VAN HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. P. 123.
- 477 Zu den Begriffen des sog. “spike” und des sog. “(neur(-on-)al) spike train” s. z.B. M.N. SHADLEN: *Rate versus Temporal Coding Models*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 819 – W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 2-4.
- 478 Grundlegend s. z.B. D.H. PERKEL / Th.H. BULLOCK: *Neural Coding*. *Neurosciences Research Program Symposium Summaries*. Vol. 3. MIT Press. 1968. PP. 405-527, v.a. PP. 416-22 – D.H. PERKEL / Th.H. BULLOCK: *Neural Coding: A Report Based on an NRP Work Session*. *Neurosciences Research Program Bulletin*. Vol. 6. 1968. PP. 219-349. Einführend s. z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: *Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 1-150. S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 13-15 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 13-16 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/MA. 2008. PP. 109-10. Einen historischen Überblick bietet z.B. Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 2-13.
- 479 S. z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: *Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges*. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 456-71 – M. ABELES: *Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex*. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 285-89.
- 480 Einführend hierzu s. z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: *Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT

andauernde intensive Debatte⁴⁸¹ darüber geführt, welches zur Auswahl stehende methodische Kodierungsschema (engl. "coding scheme") vorzuziehen sei, vor allem die Diskussionen zwischen dem traditionellen Schema, das besagt, daß die relevante Information in der mittleren Feuerrate eines Neurons enthalten sei, wohingegen in den letzten beiden Jahrzehnten mehr und mehr experimentelle Belege darauf hinzudeuten scheinen, daß daneben präzise temporale Korrelationen zwischen den Impulsen von Neuronen und Stimulus-abhängige Synchronisationen der Aktivität von neuronalen Populationen dazu beitragen, daß die neuronale Information adäquat strukturiert bzw. kodiert wird, weshalb nun kurz auf die verschiedenen Schemata bzw. Strategien der neuronalen Kodierung eingegangen wird.

3.21 KODIERUNGS- VS. DEKODIERUNGSANALYSE

Vorab ist noch zu bemerken, daß man die Forschungsthematik der neuronalen Kodierung aus zwei komplementären Perspektiven betrachten kann⁴⁸², u.z., zum einen, unter der Perspektive der Analyse des sog. „Kodierungsprozes-

Press. Cambridge/MA. 1997 – W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002.

481 S. hierzu einfürend z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 819-25, v.a. P. 820 – Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-79 – J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 375-76 – Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): Oxford Handbook of Philosophy of Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 349-50.

S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 14-15 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 12-13.

S. hierzu eingehend z.B. W. BIALEK / Fr. RIEKE / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / D. WARLAND: Reading a Neural Code. Science. Vol. 252. 1991. PP. 1854-57, v.a. PP. 1854-55, 1857 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. VAN HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40 – M.N. SHADLEN / W.T. NEWSOME: Noise, Neural Codes and Cortical Organization. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 4. 1994. PP. 569-79 – J.J. HOPFIELD: Pattern Recognition Computation Using Action Potential Timing for Stimulus Representation. Nature. Vol. 376. 1995. PP. 33-36, v.a. PP. 33, 35-36 – W.R. SOFTKY: Simple Codes versus Efficient Codes. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. PP. 239-47, v.a. PP. 245-46 – K.J. FRISTON: Another Neural Code? Neuroimage. Vol. 5. 1997. PP. 213-20, v.a. PP. 213-14 – M.W. ORAM / M.C. WIENER / R. LESTIENNE / B.J. RICHMOND: Stochastic Nature of Precisely Timed Spike Patterns in Visual System Neuronal Responses. Journal of Neurophysiology. Vol. 81. 1999. PP. 3021-33, v.a. PP. 3021-22, 3029-31 – R.B. STEIN / R.R. GOSSSEN / K.E. JONES: Neuronal Variability: Noise or Part of the Signal? Nature Reviews Neuroscience. Vol. 6. 2005. PP. 389-97, v.a. PP. 390-91.

482 Einführend s. z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. Nature Neuroscience. Vol. 7. 2004. PP. 458-59.

S. auch Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): Oxford Handbook of Philosophy of Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 348-49.

ses“ (engl. “encoding process”)⁴⁸³, der das Antwortverhalten (engl. “response”) eines Neurons oder mehrerer Neuronen als eine Funktion von bestimmten physischen Umgebungsvariablen, dem sog. „Stimulus“ (engl. “stimulus”)⁴⁸⁴, anhand der Erzeugung von neuronalen Aktionspotentialen beschreibt, oder, zum anderen, unter der Perspektive der Analyse des sog. „Dekodierungsprozesses“ (engl. “decoding process”)⁴⁸⁵, der – zumindest prinzipiell – anhand von Dekodierungsalgorithmen die (geschätzte) Rekonstruktion des ursprünglich kodierten Stimulus – bzw. spezifischer Aspekte dessen – aus einer Sequenz von Aktionspotentialen beschreibt.

3.22 SCHEMA 1: KODIERUNG ANHAND DER MITTLEREN FEUERRATE ODER FREQUENZKODIERUNG

Die klassische (statistische) Kodierungsstrategie besteht darin anzunehmen, daß die relevante Information, d.h. der Intensitätsgrad eines Stimulus oder Signals, in der (mittleren) Feuerrate eines Neurons enthalten ist (engl. “(mean) firing rate coding”)⁴⁸⁶, bezogen auf die Anzahl der gezählten Spikes in einem

-
- 483 S. hierzu einführend z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: *Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 3-85.
S. auch Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 19-54.
- 484 S. hierzu einführend z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: *Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 18-19.
S. auch E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: *Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges*. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. P. 456.
- 485 S. hierzu einführend z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: *Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 87-150.
S. auch Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 76-98.
- 486 Grundlegend s. z.B. E.D. ADRIAN / Y. ZOTTERMAN: *The Impulses Produced by Sensory Nerve Endings. Part II: The Response of a Single End Organ*. *Journal of Physiology*. Vol. 61. 1926. PP. 151-71 – D.H. HUBEL / T.N. WIESEL: *Receptive Fields of Single Neurons in the Cat's Striate Cortex*. *Journal of Physiology*. Vol. 148. 1959. PP. 574-91, v.a. P. 576.
Einführend s. z.B. F. GABBIANI: *Rate Coding and Signal Processing*. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 941-45, v.a. PP. 941-43 – M.N. SHADLEN: *Rate versus Temporal Coding*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 819-25, v.a. PP. 819-20 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): *Principles of Neural Science*. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. P. 1606.
S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 14, 15-18, 194 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 2-13, v.a. PP. 3-4, 7-8, PP. 28-38, v.a. PP. 29, 32.
Die Definition der mittleren Feuerrate v erhält man somit nach W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. P. 14 gemäß

$$v = \frac{n_{sp}(T)}{T} \quad (25)$$

wobei T ein Zeitintervall beschreibt, währenddessen die Anzahl der Aktionspotentiale bzw. Spikes

bestimmten Zeitintervall, i.d.R. 100 Millisekunden (engl. "spike-count rate coding")⁴⁸⁷, d.h. im Grunde anhand der Frequenz eines Neurons kodiert wird (engl. "frequency coding")⁴⁸⁸, wobei dieselbe Stimulation auch mehrere Male wiederholt werden kann, und dann in einem sog. "Peri-Stimulus-Time Histogram (PSTH)"⁴⁸⁹ aufgezeichnet wird (engl. "spike-density rate coding" oder "time-dependent firing rate coding")⁴⁹⁰, wohingegen die Identität eines Stimulus anhand der Position der Neuronen im Kortex (engl. "place coding")⁴⁹¹ und anhand von sehr spezifischen (Projektions-)Bahnen bzw. von „markierten Leitungen“ (engl. "labeled-line coding")⁴⁹² dahin, kodiert wird.

n_{sp} eines Neurons gezählt werden.

Zur Kritik am Konzept des sog. "(mean) firing rate coding" s. z.B. W. BIALEK / Fr. RIEKE / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / D. WARLAND: Reading a Neural Code. *Science*. Vol. 252. 1991. PP. 1854-57 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. VAN HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40 – M.N. SHADLEN / W.T. NEWSOME: Noise, Neural Codes and Cortical Organization. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 4. 1994. PP. 569-79 – J.J. HOPFIELD: Pattern Recognition Computation Using Action Potential Timing for Stimulus Representation. *Nature*. Vol. 376. 1995. PP. 33-36, v.a. PP. 33, 35-36 – W.R. SOFTKY: Simple Codes versus Efficient Codes. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 5. 1995. PP. 239-47, v.a. PP. 245-46 – M.W. ORAM / M.C. WIEGENER / R. LESTIENNE / B.J. RICHMOND: Stochastic Nature of Precisely Timed Spike Patterns in Visual System Neuronal Responses. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 81. 1999. PP. 3021-33, v.a. PP. 3027-31 – R.B. STEIN / R.R. GOSSSEN / K.E. JONES: Neuronal Variability: Noise or Part of the Signal? *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 6. 2005. PP. 389-97, v.a. PP. 390-91.

Bei sich zeitlich verändernden dynamischen Signalen wird demgegenüber eine Information aber anhand der sich zeitlich verändernden (instantanen) Feuerrate eines Neurons kodiert (engl. "time-varying rate coding" oder "instantaneous rate coding"), wobei dieses Kodierungsschema m.E. bereits als eine sog. „temporale Kodierung“ (engl. "temporal coding") aufzufassen wäre. S. hierzu z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 821-22 – F. GABBIANI: Rate Coding and Signal Processing. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 943-44.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.23.

487 S. z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 15-17.

488 S. z.B. Chr. HÖLSCHER: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): *Information Processing by Neuronal Populations*. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 7-8.

489 S. zum sog. "(Joint) Peri-Stimulus-Time Histogram ((J)PSTH)" z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. P. 457.

490 S. z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 17-18.

491 S. z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 822.

492 S. z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 822 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 287 – Chr. HÖLSCHER: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): *Information Processing by Neuronal Populations*. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 8-9.

S. auch W. SINGER / A.K. ENGEL / A.K. KREITER / M.H.J. MUNK / S. NEUENSCHWANDER / P.R.

3.23 SCHEMA 2: TEMPORALE KODIERUNG

Seit einigen Jahrzehnten gibt es nun zunehmend experimentelle Belege⁴⁹³ dafür, daß schnell wechselnde Veränderungen in der zeitlichen Abfolge von Aktionspotentialen für die Kodierung von bestimmten Aspekten der neuronalen Information von Bedeutung sind (sog. „temporale (En-)Kodierung“ (engl. “temporal (en-)coding”))⁴⁹⁴, etwa ein bestimmtes zeitliches Muster der Intervalle zwischen den einzelnen Aktionspotentialen (engl. “spike bar code” oder “interspike intervall code”)⁴⁹⁵, die zeitliche Veränderung der Feuerrate in einer Sequenz von Aktionspotentialen (engl. “rate waveform code”)⁴⁹⁶, das zeitliche Auftreten eines bestimmten Aktionspotentials nach der Präsentation eines neuen Stimulus (engl. “delay coding”)⁴⁹⁷ oder in Bezug auf ein periodisches

ROELFSEMA: Neuronal Assemblies: Necessity, Signature and Detectability. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 1. PP. 252, 253 – Chr. von der MALSBERG: Synaptic Plasticity as Basis of Brain Organization. In: J.P. CHANGEUX / M. KONISHI (Eds.): The Neural and Molecular Bases of Learning. Report of the Dahlem Workshop on the Neural and Molecular Bases of Learning. Berlin 1985, December 8-13. Wiley. Chichester u.a. 1987. PP. 415-16.

493 S. z.B. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 299-300.

494 Einführend s. z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 37-39.

S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 14-15, 20-27 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 28-38, 54-60 – Chr. HÖLSCHER: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): Information Processing by Neuronal Populations. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 13-16.

Eingehend s. z.B. M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. VAN HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40 – M.N. SHADLEN / W.T. NEWSOME: The Variable Discharge of Cortical Neurons: Implications for Connectivity, Computation, and Information Coding. Journal of Neuroscience. Vol. 18. 1998. PP. 3870-3896, v.a. P. 3888 – R.B. STEIN / R.R. GOSSSEN / K.E. JONES: Neuronal Variability: Noise or Part of the Signal? Nature Reviews Neuroscience. Vol. 6. 2005. PP. 389-97, v.a. PP. 390-91, 391-92 – Fr. THEUNISSEN / J.P. MILLER: Temporal Encoding in Nervous Systems: A Rigorous Definition. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 2. 1995. PP. 149-62, v.a. PP. 155-57, 158: “Considering the confusing nature of the terminology, we propose the strict use of *temporal coding* when referring to the encoding of temporal aspects of the significant information, such as the phase of a frequency component of a signal, and the use of *temporal encoding* when referring to schemes for encoding information in which spike patterns on a time scale less than the duration of the encoding window correlate significantly with stimulus patterns.”

495 S. z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 822-23 – R.B. STEIN / R.R. GOSSSEN / K.E. JONES: Neuronal Variability: Noise or Part of the Signal? Nature Reviews Neuroscience. Vol. 6. 2005. PP. 390-91, 394, 395.

496 S. z.B. M.N. SHADLEN: Rate versus Temporal Coding. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 823.

497 S. z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 20-21 – L. KOSTAL / P. LANSKY / J.-P. ROSPARS: Neuronal Coding and Spiking Randomness. European Journal of Neuroscience. Vol. 26. 2007. P. 2693.

Signal, z.B. eine Oszillation (engl. "phase coding")⁴⁹⁸.

Daneben gibt es zunehmend experimentelle Belege dafür, daß präzise temporale Korrelationen zwischen den Impulsen von Neuronen⁴⁹⁹ und Stimulus-abhängige temporale Synchronisationen der kohärenten Aktivität von neuronalen Populationen⁵⁰⁰, den sog. "assemblies"⁵⁰¹, dazu beitragen, daß das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general) binding problem")⁵⁰² anhand der sog. „(Synchronizitäts-)Bindungshypothese“ (engl. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis")⁵⁰³ gelöst wird, worauf in Kapitel 3.3. und 3.4 ausführlich eingegangen wird.

3.24 SCHEMA 3: POPULATIONSKODIERUNG

3.240 Im Gegensatz zu der klassischen Frequenzkodierungsstrategie⁵⁰⁴, die zuerst nur anhand von Messungen der neuronalen Aktivität an einzelnen Neuronen entwickelt worden war (engl. "single-cell coding")⁵⁰⁵, besagt die sog. „Populationskodierung“ (engl. "(Ensemble) Population Coding")⁵⁰⁶, daß die Informa-

498 S. z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. P. 21 – Chr. HÖLSCHER: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): Information Processing by Neuronal Populations. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 9-11 – M.A. MONTEMURRO / M.J. RASCH / Y. MURAYAMA / N.K. LOGOTHETIS / St. PANZERI: Phase-of-Firing Coding of Natural Visual Stimuli in Primary Visual Cortex. Current Biology. Vol. 18. 2008. PP. 375-80, v.a. PP. 375-77.

499 S. z.B. M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. VAN HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40 – R. LESTIENNE: Determination of the Precision of Spike Timing in the Visual Cortex of Anaesthetised Cats. Biological Cybernetics. Vol. 74. 1996. PP. 55-61, v.a. PP. 56-57.

500 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3 und 3.4.

501 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.243, Fn. 522 und 3.240, Fn. 506.

502 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3 und 3.410.

503 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.423.

504 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.22.

505 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.421.

Zur Kritik daran s. z.B. Chr. von der MALSBERG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. P. 1179.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.11.

506 Grundlegend hierzu s. z.B. D.O. HEBB: The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. Wiley-Interscience. New York. 1949. PP. 69-74, 84-91 der bereits im Jahr 1949 die Hypothese formulierte, daß sich die Neuronen zu Zellverbänden (engl. "cell assemblies") zusammenschließen, die damit als funktionale Einheiten der neuronalen Informationsverarbeitung anzusehen seien.

Einführend hierzu s. z.B. A. POUGET / P.E. LATHAM: Population Codes. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 893-97, die vor allem informationstheoretische Dekodierungstechniken erörtern – P. DAYAN / L.F. ABBOTT: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 97-113 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 286-88, 294.

S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 18-20 – Chr. HÖLSCHER: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): Information Processing

tion eines Stimulus anhand der gemeinsamen Aktivitäten einer ganzen Gruppe bzw. einer Population von Neuronen kodiert wird, wobei ein individuelles Neuron in der Population bevorzugt auf einen ganz bestimmten Stimulusaspekt selektiv anspricht, jedoch sich die statistischen Aktivitäts(-verteilungs-)funktionen der einzelnen schwach selektiven Neuronen überlappen, sodaß nicht notwendigerweise alle, sondern nur eine begrenzte Anzahl von Neuronen auf einen bestimmten Stimulusaspekt ansprechen.

3.24.1 In Experimenten an (Rhesus-)Affen hat A.P. GEORGOPOULOS et al.⁵⁰⁷ gezeigt, daß jedes Neuron im motorischen Kortex eine bevorzugte Bewegungsrichtung eines Arms zu kodieren scheint, aber die Kodierung dieser Bewegungsrichtung nur sehr schwach selektiv angelegt ist, sodaß eine bestimmte Bewegungsrichtung nur durch die gemeinsame Aktivität einer Neuronenpopulation bestimmt werden kann, und sich im Rahmen der Dekodierung anhand des sog. „(neuronalen) Populationsvektors“ (engl. „(neuronal) population vector“)⁵⁰⁸ die Bewegungsrichtung eines Armes voraussagen läßt, indem

by Neuronal Populations. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 3-17, v.a. PP. 11-13 – R. QUIAN QUIROGA / S. PANZERI: Extracting Information from Neural Populations: Information Theory and Decoding Approaches. Nature Reviews Neuroscience. Vol. 10. 2009. PP. 173-85 – G. PIPA: The Neuronal Code: Development of Tools and Hypotheses for Understanding the Role of Synchronization of Neuronal Activity. Dissertation. University of Technology. Berlin. 2006. PP. 4-6. Einen historischen Überblick zur Populationskodierung bietet z.B. J.T. McILWAIN: Population Coding: A Historical Scetch. In: M.A.L. NICOLELIS (Ed.): Advances in Neural Population Coding. Elsevier. Amsterdam. 2001. PP. 3-7.

507 Grundlegend s. z.B. A.P. GEORGOPOULOS / J. KALASKA / R. CAMINITI / J. MASSEY: On the Relations between the Direction of Two-Dimensional Arm Movements and Gell Discharge in Primate Motor Cortex. The Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1982. PP. 1527-37, v.a. PP. 1534-37 – A.P. GEORGOPOULOS / R. CAMINITI / J. KALASKA / J. MASSEY: Spatial Coding of Movement: A Hypothesis Concerning the Coding of Movement Direction by Motor Control Populations. Experimental Brain Research Supplement. Vol. 7. 1983. PP. 327-36, v.a. PP. 332, 335 – A.P. GEORGOPOULOS / A.B. SCHWARTZ / R.E. KETTNER: Neuronal Population Coding of Movement Direction. Science. Vol. 233. 1986. PP. 1416-19, v.a. PP. 1417-18 – A.P. GEORGOPOULOS / R.E. KETTNER / A.B. SCHWARTZ: Primate Motor Cortex and Free Arm Movements to Visual Targets in Three-Dimensional Space. II. Coding of the Direction of the Movement by a Neuronal Population. The Journal of Neuroscience. Vol. 8. 1988. PP. 2928-37, PP. 2933-35 – A.P. GEORGOPOULOS / J.T. LURIOT / M. PETRIDES / A.B. SCHWARTZ / J.T. MASSEY: Mental Rotation of the Neuronal Population Vector. Science. Vol. 243. 1989. PP. 234-36. Einführend s. z.B. B. AMIRIKIAN / A.P. GEORGOPOULOS: Motor Cortex: Coding and Decoding of Directional Operations. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 690-96 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 523-25 – M.S. GAZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 271-73 – Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 351-53. S. auch W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 19-20 – Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. P. 256.

508 S. z.B. A.P. GEORGOPOULOS / R.E. KETTNER / A.B. SCHWARTZ: Primate Motor Cortex and Free Arm Movements to Visual Targets in Three-Dimensional Space. II. Coding of the Direction of the Movement by a Neuronal Population. The Journal of Neuroscience. Vol. 8. 1988. PP. 2928-37, v.a.

die Feuerraten der Neuronen im motorischen Kortex mit deren bevorzugter Bewegungsrichtung multipliziert werden, und anschließend diese Daten über die entsprechende Population von Motoneuronen vektoriell summiert wird (engl. "population rate coding")⁵⁰⁹.

3.24.2 Demgegenüber ist für S. THORPE et al.⁵¹⁰ die zeitliche Rangordnung der Aktivität jedes Neurons in einer Population entscheidend für die Informationskodierung, sodaß, indem er die asynchronen Aktivitäten einer Neuronenpopulation zu Grunde legt, bezogen auf den Zeitpunkt der Stimulusdarbietung, wird dem Neuron, das – relativ zu den anderen in der Population – als erstes ein Aktionspotential erzeugt, als eine Funktion seiner Aktivierung ein höherer Rang zugewiesen (engl. "population rank coding").⁵¹¹

3.24.3 Daneben gibt es, wie schon erwähnt⁵¹², zunehmend experimentelle Belege dafür, daß Stimulus-abhängige temporale Synchronisationen der kohärenten Aktivität von neuronalen Populationen⁵¹³, den sog. "assemblies"⁵¹⁴, dazu beitragen (engl. "assembly coding" oder "assembly hypothesis")⁵¹⁵, daß das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general) binding problem")⁵¹⁶ anhand der sog. (Synchronizitäts-)Bindungshypothese (engl. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis")⁵¹⁷ gelöst wird, worauf in Kapitel 3.3. und 3.4 ausführlich eingegangen wird.

Im Gegensatz zu der klassischen (Kodierungs-)Strategie in Bezug auf die Repräsentation von Relationen bzw. Konstellationen der Eigenschaften von per-

P. 2929 – A.P. GEORGOPOULOS / R. CAMINITI / J. KALASKA / J. MASSEY: Spatial Coding of Movement: A Hypothesis Concerning the Coding of Movement Direction by Motor Control Populations. *Experimental Brain Research Supplement*. Vol. 7. 1983. PP. 327-36, v.a. P. 335 – A.P. GEORGOPOULOS / A.B. SCHWARTZ / R.E. KETTNER: Neuronal Population Coding of Movement Direction. *Science*. Vol. 233. 1986. PP. 1416-19, v.a. PP. 1417, 1418, Fig. 5 – A.P. GEORGOPOULOS / R.E. KETTNER / A.B. SCHWARTZ: Primate Motor Cortex and Free Arm Movements to Visual Targets in Three-Dimensional Space. II. Coding of the Direction of the Movement by a Neuronal Population. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 8. 1988. PP. 2928-37, PP. 2928 – A.P. GEORGOPOULOS / J.T. LURIOT / M. PETRIDES / A.B. SCHWARTZ / J.T. MASSEY: Mental Rotation of the Neuronal Population Vector. *Science*. Vol. 243. 1989. P. 235.

509 S. z.B. G. PIPA: *The Neuronal Code: Development of Tools and Hypotheses for Understanding the Role of Synchronization of Neuronal Activity*. Dissertation. University of Technology. Berlin. 2006. P. 5.

510 S. z.B. J. GAUTRAIS / S. THORPE: Rate Coding versus Temporal Order Coding: A Theoretical Approach. *BioSystems*. Vol. 48. 1998. PP. 57-65, v.a. P. 63 – A. DELORME / L. PERRINET / S.J. THORPE: Networks of Integrate-and-fire Neurons Using Rank Order Coding B: Spike Timing Dependent Plasticity and Emergence of Orientation Selectivity. *Neurocomputing*. Vol. 38-40. 2001. PP. 539-45, v.a. P. 542 – R. VANRULLEN / S.J. THORPE: Rate Coding Versus Temporal Order Coding: What the Retinal Ganglion Cells Tell the Visual Cortex. *Neural Computation*. Vol. 13. 2001. PP. 1255-83, v.a. PP. 1261-63 – R. VANRULLEN / R. GUYONNEAU / S.J. THORPE: Spike Times Make Sense. *Trends in Neurosciences*. Vol. 28. 2005. PP. 1-4, v.a. PP. 1-2.

511 S. z.B. G. PIPA: *The Neuronal Code: Development of Tools and Hypotheses for Understanding the Role of Synchronization of Neuronal Activity*. Dissertation. University of Technology. Berlin. 2006. P. 5.

512 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.23.

513 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3 und 3.4.

514 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.23 und 3.423.

515 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3 und 3.4.

516 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3 und 3.410.

517 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.423.

zeptuellen Objekten (sog. "combination coding"), wonach sog. "conjunction-specific (binding) neurons"⁵¹⁸ auf höheren Verarbeitungsebenen, auch "elaborate cells"⁵¹⁹ genannt, konvergente (Signal-)Eingaben in verschiedenen Konstellationen von Neuronen in niederen Verarbeitungsebenen erhalten, so daß eine Eigenschaftsbindung anhand einer (temporalen) Signalkonvergenz im Rahmen von fest verdrahteten (Projektions-)Bahnen erfolgt (sog. "labeled-line coding")⁵²⁰, wird nun – in Anlehnung an D.O. HEBB⁵²¹ – eine dazu parallele (Kodierungs-)Strategie postuliert, wonach vielfach rekurrent und reziprok verknüpfte, sich überlappende Zellverbände anhand ihrer synchronen Aktivität eine dynamische und kontextabhängige Assoziation von Neuronen in funktionell kohärente sog. "assemblies"⁵²² gewährleisten.⁵²³

-
- 518 S. z.B. W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-65.
S. auch R.C. REID / J.M. ALONSO: Specificity of Monosynaptic Connections from Thalamus to Visual Cortex. *Nature*. Vol. 387. 1995. PP. 281-84 – B. CHAPMAN / K.R. ZAHS M.P. STRYKER: Relation of Cortical Cell Orientation Selectivity to Alignment of Receptive Fields of the Geniculocortical Afferents that Arborize within a Single Orientation Column in Ferret Visual Cortex. *Journal of Neuroscience*. Vol. 11. 1991. PP. 1347-58 – B. JAGADEESH / H.S. WHEAT / D. FERSTER: Linearity of Summation of Synaptic Potentials Underlying Direction Selectivity of Simple Cells of the Cat Visual Cortex. *Science*. Vol. 262. 1993. PP. 1901-1904.
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.24.4.
- 519 S. z.B. K. TANAKA / H. SAITO / Y. FUKADA / M. MORIYA: Coding Visual Images of Objects in the Inferotemporal Cortex of the Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 66. 1991. PP. 170-89, v.a. PP. 173, 187-88.
- 520 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.22, Fn. 492.
- 521 S. D.O. HEBB: *The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory*. Wiley-Interscience. New York. 1949. PP. 69-74.
Einführend s. z.B. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 831-33.
- 522 S. z.B. G. PALM: Cell Assemblies as a Guideline for Brain Research. *Concepts in Neuroscience*. Vol. 1. 1990. PP. 133-37 – G.L. GERSTEIN / P. BEDENBAUGH / A. AERTSEN: Neuronal Assemblies. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*. Vol. 36. 1989. PP. 4-14 – Chr. von der MALSBURG: Am I Thinking Assemblies? In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): *Brain Theory*. Springer-Verlag. Berlin. 1986. PP. 161-76 – G. PALM: Neural Assemblies. An Alternative Approach to Artificial Intelligence. Springer-Verlag. Berlin. 1982. PP. 119-20, 144, 214-17, 218-40 – V. BRAITENBERG: Cell Assemblies in the Cerebral Cortex. In: R. HEIM / G. PALM (Eds.): *Theoretical Approaches to Complex Systems*. Springer-Verlag. Berlin. 1978. PP. 171-88.
Die Vorzüge des "assembly coding" werden eingehend erörtert in Y. SAKURAI: How do Cell Assemblies Encode Information in the Brain? *Neuroscience Biobehavioral Reviews*. Vol. 23. 1999. PP. 785-96.
- 523 S. z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1136-43, v.a. P. 1136 – W. SINGER / A.K. ENGEL / A.K. KREITER / M.H.J. MUNK / S. NEUENSCHWANDER / P.R. ROELFSEMA / P. KÖNIG: Neuronal Assemblies: Necessity, Signature and Detectability. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 1. 1997. PP. 252-61 – W.A. PHILLIPS / W. SINGER: In Search of Common Foundations for Cortical Computation. *The Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 657-722, v.a. PP. 662-63, 671-73, 680 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-65.
S. auch A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 616-19 – A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 7-17.

3.24.4 Sofern jedoch eine eindeutige Zuordnung von zwei oder mehreren (perzeptuellen) Objekten, die gleichzeitig präsentiert werden, im Rahmen des sog. „(allgemeinen) Bindungsproblems“ (engl. “(general) binding problem”) vorgenommen werden muß, wird (noch) in einer Vielzahl von Fällen die, wie bereits erwähnt⁵²⁴, klassische (Kodierungs-)Strategie des sog. “(Local)⁵²⁵ Conjunctive (En-)Coding”⁵²⁶ angewendet, wonach jeweils ein einziges, sich nicht mit anderen überlappendes Neuron jede mögliche Kombination bzw. Konjunktion (engl. “conjunction”) von Informationselementen, wie z.B. von Objekten und Objekteigenschaften, repräsentiert, was allerdings zumeist sehr ineffizient sein kann.⁵²⁷

3.24.5 Einen höheren Grad an Effizienz wird mit der Kodierungsstrategie des sog. “Coarse Coding”⁵²⁸ erreicht, indem jedes Neuron eines Verbandes anhand einer kreisförmigen Region mit demselben Radius r , die sein rezeptives Feld (engl. “receptive field”)⁵²⁹ darstellt, repräsentiert wird, sodaß ein Punkt der k -dimensionalen Datenmenge durch eine Mehrzahl von sich überlagernden Regionen n dargestellt wird, wobei mit einer Vergrößerung des Radius der Regionen die Genauigkeit (engl. “accuracy”) a der Kodierung steigt gemäß:

$$a \propto nr^{k-1}. \quad (26)$$

3.25 SPARSE CODING

Ein sehr wichtiges Charakteristikum im Rahmen der Analyse des neuronalen Codes (engl. “neural code”), der definiert, welches neurale Aktivitätsmuster (engl. “pattern of neural activity”) zu einem bestimmten zu kodierenden (sen-

Einführend s. z.B. A. PETERS / B.R. PAYNE (Eds.): The Cat Primary Visual Cortex. Academic Press. San Diego. 2002. PP. 523-30.

524 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.24.3.

525 Diese Technik kann man auch auf distribuierte Repräsentationen anwenden.

S. hierzu z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. PP. 1005.

526 Eingehend s. z.B. G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART: Distributed Representations. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 77-109, v.a. PP. 90-91.

Einführend s. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. PP. 1004-1005 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 80.

527 S. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. PP. 1004-1005 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 80.

528 Eingehend s. z.B. G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART: Distributed Representations. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 77-109, v.a. PP. 91-94.

Einführend s. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1005 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 80-82.

S. auch A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 27.

529 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.424.01.

sorischen) Informationselement zugeordnet wird, besteht nun darin, den Anteil der in einer Population aktiven Neuronen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu bestimmen (engl. "activity ratio")⁵³⁰, wobei man von einem sog. "Sparse Coding"⁵³¹ spricht, wenn ein Informationselement möglichst von einer relativ kleinen (Unter-)Menge von (stark) aktivierten Neuronen repräsentiert wird, m.a.W. die neurale Repräsentation einen geringen Grad an Dichte (engl. "density")⁵³² aufweist, z.B. in Form von sog. "local codes"⁵³³ oder "dense distributed or 'holographic' codes"⁵³⁴.

530 S. z.B. P. FÖLDIÁK: Sparse Coding in the Primate Cortex. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1066.

531 Einführend s. z.B. P. FÖLDIÁK: Sparse Coding in the Primate Cortex. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1064-68, v.a. PP. 1065-66 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1003 – P. DAYAN / L.F. ABBOTT: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 378-87. S. auch Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. S. 60.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.222.2.

532 S. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1003.

533 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.2.

534 S. z.B. P. FÖLDIÁK: Sparse Coding in the Primate Cortex. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1065.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.

3.3 (ALLGEMEINES) BINDUNGSPROBLEM UND INTEGRATIVE NEUR(-ON-)ALE (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN IN DEN (KOGNITIVEN) NEUROWISSENSCHAFTEN

3.30 Das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. “(general) binding problem”) in den Neuro- und Kognitionswissenschaften⁵³⁵ umfaßt eine Klasse von diversen perzeptuellen, kognitiven und aktionalen (Sub-)Problemen in der Wahrnehmungs- und (kognitiven) (Neuro-)Psychologie, in der medizinischen Neurophysiologie und in der (kognitiven) Neurobiologie⁵³⁶, wonach ein neuro-

535 Eine vertiefende Einführung bieten z.B. V.G. HARDCASTLE: The Binding Problem. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. PP. 555-65 – J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 374-82, v.a. PP. 374-76 – W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 81-84, v.a. PP. 81-82 – Chr. von der MALSBERG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-80 – J. HUMMEL: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 85-86 – A.O. HOLCOMBE: The Binding Problem. In: E.Br. GOLDSTEIN (Ed.): The Sage Encyclopedia of Perception. Vol. 1. SAGE Publications. Thousand Oaks/CA. 2010. PP. 205-208.

Einen eingehenden Überblick bieten auch Chr. von der MALSBERG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 95-104 – A. TREISMAN: The Binding Problem. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 6. No. 2. 1996. PP. 171-78 – A. TREISMAN: Solutions to the Binding Problem: Progress through Controversy and Convergence. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 105-10 – A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 1-16, 134-37 – Chr. HERRMANN: Bedeutung von 40-Hz-Oszillationen für kognitive Prozesse. Habilitation. Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie. Universität Leipzig. Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften. Sächsisches Digitalzentrum. Dresden. Leipzig. 2002. S. 3-13 – M.R. BENNETT / P.M.S. HACKER: History of Cognitive Neuroscience. Wiley-Blackwell. Malden/MA. 2008. PP. 32-39.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten z.B. A.L. ROSKIES: Introduction: The Binding Problem. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 7-9 – A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Ed. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 55-65 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. S. 156-94 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 122-52 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Bildung repräsentationaler Zustände im Gehirn. In: Spektrum der Wissenschaften. Hf. 9. 1993. S. 42-47 – B. SCHECHTER: How the Brain Gets Rhythm. Science. Vol. 274. 1996. PP. 339-40 – R. GOEBEL: Synchrone Oszillationen in visuellen Systemen und in neuronalen Netzwerk-Modellen. In: I.DUWE / F. KURFESS / G. PAASS / G. PALM / H. RITTER / S. VOGEL (Hrsg.): Konnektionismus und Neuronale Netze. Beiträge zur Herbstschule (HeKoNN'94). Münster/Westfalen, 10.-14. Oktober 1994. GMD-Studien. Nr. 242. 1994. S. 308-10, 311.

536 S. z.B. A.L. ROSKIES: Introduction: The Binding Problem. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 7, 8 – A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 1-6.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.410.

Nach A.L. ROSKIES: Introduction: The Binding Problem. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 7-8 und A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 2-3 tritt ein Bindungsproblem z.B. in der Wahrnehmungspsychologie im Fall der sog. “illusory conjunctions” i.S. A. TREISMAN's auf, in der Neurologie bei diversen Läsio-

kognitives System, z.B. das menschliche Gehirn bzw. ein computationales theoretisches Modell⁵³⁷ dessen, entweder im Rahmen von sog. statischen (Bindungs-)Modellen (engl. "static binding models")⁵³⁸ oder von dynamischen (Bindungs-)Modellen (engl. "dynamic binding models")⁵³⁹ (Ver-)Bindungen (engl. "conjunctions") von Informationskomponenten zu (en-)kodieren bzw. zu repräsentieren hat⁵⁴⁰, beginnend von den grundlegendsten perzeptuellen Repräsentationen (sog. "perceptual binding problems")⁵⁴¹, wie z.B. einem visuellen Objekt (sog. "feature binding")⁵⁴², bis hin zu den komplexesten kognitiven Reprä-

nen, z.B. beim sog. "BÁLINT's syndrom" i.S. R. BÁLINT's und beim sog. "blindsight" i.S. L. WEISKRANTZ', oder in der Neurophysiologie in Bezug auf die Erklärung der hochgradig arbeitsteilig stattfindenden visuellen Wahrnehmungsverarbeitung.

S. hierzu z.B. R. BÁLINT: Seelenlähmung des 'Schauens', optische Ataxie, räumliche Störung der Aufmerksamkeit. *Monatsschriften für Psychiatrische Neurologie*. Bd. 25. 1909. S. 51-81 – G. KERKHOFF / B. HELDMANN: BÁLINT-Syndrom und assoziierte Störungen. *Nervenarzt*. Bd. 70. 1999. S. 859-69 – L. WEISKRANTZ: Blindsight. A Case Study and Implications. Oxford University Press. Oxford. 1986.

Siehe hierzu die folgenden Ausführungen in Kap. 3.31-3.34.

537 Zu den theoretischen Modellen im Konnektionismus und der Bindungsproblematik s. die Ausführungen in Kap. 4. und 5.

538 S. z.B. D.H. HUBEL / T.N. WIESEL: Receptive Fields and Functional Architecture in two Nonstriate Visual Areas. (18 and 19) of the Cat. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 28. 1965. PP. 229-89 mit ihren "higher-order hyper-complex cells", H.B. BARLOW: Single Units and Sensation: A Neuron Doctrine for Perceptual Psychology. *Perception*. Vol. 1. 1972. PP. 371-94 mit seinen "cardinal cells" oder M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 1019-25, v.a. P. 1021 mit ihrer "simple hierarchical feed-forward architecture", bestehend aus sog. "simple cells", "complex cells", "composite feature cells", "complex composite cells" und "view-tuned cells", als ein Modell der translations-invarianten Objekterkennung (engl. "translation-invariant object recognition").

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 3.24.3, 3.421, 3.422, 3.473.

539 S. z.B. W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-50.

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 3.31-3.34, 3.4.

540 Man unterscheidet in der neuralen Kodierungstheorie zwei komplementäre Bindungsstrategien, u.z., zum einen, daß die Neuronenaktivitäten über die progressive Konvergenz von axonalen Projektionsbahnen zu den nächst höheren Informationsverarbeitungsschichten zusammengebunden werden, z.B. anhand von sog. „(hyper-)komplexen Zellen“ (engl. "(hyper-)complex cells") im primären visuellen Areal V1, im sekundären visuellen Areal V2 und im Brodmann Areal 19 (V3) (sog. "binding by convergence", "binding by conjunction cells" bzw. "static binding"), oder, zum anderen, die Information über eine flexiblere Verbindung von Merkmalen in der dynamisch-temporalen Konfiguration der Antworteigenschaften einer Gruppe von verteilten Neuronenpopulationen enthalten ist (sog. "dynamic binding").

S. hierzu z.B. W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-50 – W. SINGER: Response Synchronization, Gamma Oscillations, and Perceptual Binding in Cat Primary Visual Cortex. In: A. PETERS / B.R. PAYNE (Eds.): *The Cat Primary Visual Cortex*. Academic Press. San Diego. 2002. PP. 521-59, v.a. PP. 523-33.

S. auch z.B. M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 57-69, v.a. PP. 60-61 – A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 25-32.

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 3.22, 3.24.3, 3.24.4.

541 S. z.B. A.L. ROSKIES: Introduction: The Binding Problem. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 7.

542 S. einführend z.B. W. SINGER: Neural Synchrony and Feature Binding. In: L.R. SQUIRE (Ed.): *Encyclopedia of Neuroscience*. Vol. 6. Academic Press. Oxford. 2009. PP. 253-59 – A. TREISMAN: Fea-

sentationen (sog. "cognitive binding problems")⁵⁴³, wie z.B. einer (kompositionalen) Symbolstruktur (sog. "variable binding")⁵⁴⁴. Die damit einhergehenden immensen kombinatorischen Probleme erfordern nun effiziente, dynamisch-integrative (Bindungs-)Mechanismen, die beschreiben, wie die neuronalen Informationsprozesse, die sich zugleich in räumlich getrennten (sub-)kortikalen Arealen ereignen, koordiniert und zusammengebunden (engl. "bind together") werden, um kohärente perzeptuelle und kognitive (Symbol-)Repräsentationen sowie eine angemessene motorische Aktivität zu erzeugen. Ein Kandidat zur Lösung dieses (allgemeinen) Bindungsproblems besteht nun in der Annahme von temporalen integrativen (Synchronisations-)Mechanismen, d.h. einer der koordinierenden Mechanismen scheint die (temporale) Synchronisation von neuronaler (Phasen-)Aktivität einer Population von Neuronen zu sein, basierend auf dynamischen selbstorganisierenden Prozessen in den entsprechenden neuronalen Netzwerken.⁵⁴⁵

3.31 Schon in den siebziger Jahren angedeutet und dann zu Beginn der acht-

ture Binding, Attention and Object Perception. Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences. Vol. 353. 1998. PP. 1295-1306 – A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. 2007. PP. 315-25.

543 S. Fn. 536.

544 S. einfürend hierzu z.B. J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 374-82 – J. HUMMEL: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 85 – Chr. von der MALSBURG: Binding in Models of Perception and Brain Function. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. P. 3. S. auch W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 165-66.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.

545 S. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / A.K. KREITER / T.B. SCHILLEN / W. SINGER: Temporal Coding in the Visual Cortex: New Vistas on Integration in the Nervous System. Trends in Neuroscience. Vol. 15. 1992. PP. 218-26 – W. SINGER: Synchronization of Cortical Activity and its Putative Role in Information Processing and Learning. Annual Review of Physiology. Vol. 55. 1993. PP. 349-74 – W. SINGER: Search for Coherence: A Basic Principle of Cortical Self-Organization. Concepts in Neuroscience. Vol. 1. 1990. PP. 1-26 – Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981 – Chr. von der MALSBURG: Am I Thinking Assemblies? In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): Brain Theory. Springer-Verlag. Berlin. 1986. PP. 161-76. S. auch M. ABELES: Corticonics: Neural Circuits of the Cerebral Cortex. Cambridge University Press. Cambridge 1991 – M. ABELES: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer Verl. Berlin. 1982 – G.L. GERSTEIN / P. BEDENBAUGH / A. AERTSEN: Neuronal Assemblies. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol. 36. 1989. PP. 4-14 – G. PALM: Neural Assemblies. Springer-Verlag. Berlin. 1982 – G. PALM: Cell Assemblies as a Guideline for Brain Research. Concepts in Neuroscience. Vol. 1. 1990. PP. 133-37 – V. BRAITENBERG: Cell Assemblies in the Cerebral Cortex. In: R. HEIM / G. PALM (Eds.): Theoretical Approaches to Complex Systems. Springer-Verlag. Berlin. 1978. PP. 171-88 – St. GROSSBERG: How does a Brain Build a Cognitive Code? Psychological Review. Vol. 87. 1980. PP. 1-51 – G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987.

Einen einfürenden Überblick zum Phänomen der Synchronisation in den neuronalen Systemen bietet z.B. A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 134-36.

Allgemein zum Thema des physiologischen rhythmischen Prozesses s. z.B. L. GLASS: Synchronization and Rhythmic Processes in Physiology. Nature. Vol. 410. 2001. PP. 277-84.

ziger Jahre des 20. Jhdt.'s hatte in der (Neuro-)Informatik der Physiker Christoph von der MALSBURG mit seiner sog. „Korrelationstheorie der Hirnfunktion“ (engl. “correlation theory of brain function”)⁵⁴⁶ postuliert, daß die sog. „synaptische Modulation“ (engl. “synaptic modulation”)⁵⁴⁷ von der korrelierten Aktivität eines prä- und postsynaptischen Neurons abhängt, d.h., sofern verschiedene Neuronen, die das gleichzeitige Auftreten einer Signaleigenschaft kodieren, über einen sehr kurzen Zeitraum von wenigen Millisekunden⁵⁴⁸ synchron koaktiviert werden, wird die gewichtete Kopplung der Synapsen zwischen diesen Neuronen verstärkt, was wiederum über sich selbstverstärkende positive Rückkopplungsmechanismen zu der Entstehung eines Verbandes, eines sog. „Korrelats“ (engl. “correlate”)⁵⁴⁹, dieser Neuronen führt, sodaß das Bindungsproblem anhand der (temporalen) Korrelation (engl. “correlation”)⁵⁵⁰ der synchronen Aktivität von verschiedenen Neuronen auf der Basis der Selbstorganisation⁵⁵¹ in

-
- 546 Grundlegend s. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. PP. 1-26, v.a. PP. 12-15 (wiederabgedruckt in: F. DOMANY / J.L. Van HEMMEN / K. SCHUL-TEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Temporal Aspects of Coding and Information Processing in Biological Systems. Ch. 2. Springer-Verlag. New York u.a. 1994. PP. 95-119).
Einführend s. z.B. Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-80, v.a. P. 1180 – A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 618-19 – A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 25-26.
Eine Anwendung erfährt die Korrelationstheorie i.S. Chr. von der MALSBURG's in einer Modellstudie zum sog. “Cocktail Party Effect”.
S. hierzu Chr. von der MALSBURG / W. SCHNEIDER: A Neural Cocktail-Party Processor. Biological Cybernetics. Vol. 54. 1986. PP. 29-40.
- 547 S. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. P.13.
- 548 Diese in sehr kurzen Zeiträumen stattfindenden synaptischen Modifikationen auf der Zeitskala eines Kurzzeitgedächtnisses (engl. “short-term memory”) können dann zu einer lang andauernden Gewichtsveränderung an den Synapsen i.S. der HEBB'schen sog. „synaptischen Plastizität“ (engl. “(refined) synaptic plasticity”) umgewandelt werden, was einem Langzeitgedächtnis (engl. “long-term memory”) entsprechen würde.
S. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. P. 13.
- 549 S. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. PP. 15-16.
- 550 S. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. P. 12.
- 551 S. z.B. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. PP. 7, 18-19, wo er die Analogie zu anderen selbstorganisierenden Systemmodellen, z.B. dem der sog. „Synergetik“ i.S. H. HAKEN's, betont.
Eingehend hierzu s. z.B. Chr. von der MALSBURG: Self-Organization and the Brain. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1002-1005.
S. auch Chr. von der MALSBURG: Self-Organization of Orientation Selective Cells in the Striate Cortex. Kybernetik. Vol. 14. 1973. PP. 85-100, v.a. P. 88 – Chr. von der MALSBURG / D.J. WILLSHAW:

einem (künstlichen) Topologischen Netzwerk (engl. "Topological Network")⁵⁵² gelöst werden könne.

In der Zwischenzeit ist, wie es Chr. von der MALSBURG⁵⁵³ in seinem (Überblicks-) Aufsatz aus dem Jahr 1999 beschreibt, der (Synchronisations-)Mechanismus i.S. der zeitlichen Bindung (engl. "temporal binding")⁵⁵⁴ auf eine Vielzahl von (Bindungs-)Problemen erfolgreich angewendet worden, z.B. auf folgende Themen: "(...) these [problems] are logical reasoning, figure-ground segregation in the visual, auditory and olfactory modalities, and in invariant object recognition"⁵⁵⁵, indem vor allem die sog. „Superpositionskatastrophe“ (engl. "superposition catastrophe")⁵⁵⁶ i.S. Fr. ROSENBLATT's⁵⁵⁷ vermieden wird.

Eine Weiterentwicklung seiner Signalkorrelationstheorie hat Chr. von der MALSBURG mit der sog. "Dynamic Link Architecture (DLA)" vorgenommen, worauf in Kap. 5.1.10 eingegangen wird.

3.32 Seit den achtziger Jahren des 20. Jhdts hatte demgegenüber in der (Wahrnehmungs- und Kognitions-)Psychologie die britisch-U.S.-amerikanische Psychologin Anne M. TREISMAN mit ihrer sehr einflußreichen sog. „Merkmalsintegrationstheorie (MIT) der (visuellen) Aufmerksamkeit“ (engl. "Feature-Integra-

How Patterned Neural Connections can be Set Up by Self-Organization. Proceedings of the Royal Society of London. Vol. B 194. 1976. PP. 431-45, v.a. PP. 433-35 – Chr. von der MALSBURG / W. SINGER: Principles of Cortical Network Organization. In: P. RAKIC / W. SINGER (Eds.): Neurobiology of Neocortex. Wiley. Chichester u.a. 1988. PP. 69-99 – Chr. von der MALSBURG: Network Self-Organization. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. Academic Press. 1990. PP. 421-32, v.a. PP. 421-23 – Chr. von der MALSBURG: Network Self-Organization in the Ontogenesis of the Mammalian Visual System. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. 2nd Ed. Academic Press. 1995. PP. 447-63, v.a. PP. 447-48 – L. WISKOTT / Chr. von der MALSBURG: Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System. In: K. MAINZER (Hrsg.): Komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Springer Verl. 1999. S. 169-88 – J. TRIESCH / Chr. von der MALSBURG: Democratic Integration: Self-Organized Integration of Adaptive Cues. Neural Computation. Vol. 13. 2001. PP. 2049-74, v.a. P. 2049, 2050 – Chr. von der MALSBURG: How are Neural Signals Related to Each Other and to the World? Journal of Consciousness Studies. Vol. 9. 2002. PP. 47-60, v.a. PP. 50-54.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.23.

552 Die Struktur des Netzwerks wird in Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981. PP. 15-19 beschrieben.

553 S. Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 95-104, v.a. P. 96.

S. auch Chr. von der MALSBURG: Binding in Models of Perception and Brain Function. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. PP. 520-26, v.a. PP. 522-23.

554 S. Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. P. 1180.

555 S. Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. P. 1180.

556 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.0, 6.31.

557 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.31.

tion Theory (FIT) of (Visual) Attention")⁵⁵⁸ das Problem der Bindung im visuellen Wahrnehmungsprozeß thematisiert, d.h.: Wie werden die separat kodierten Merkmale eines Objekts zu einer kohärenten Objektrepräsentation verbunden? In ihrer Theorie wird nun davon ausgegangen, daß für die Analyse einer visuellen Szene mindestens zwei (Informations-)Verarbeitungsstufen notwendig seien, u.z. werden zunächst in einem schnellen, präattentiven Prozeß, der nicht von der Aufmerksamkeitszuwendung abhängt, die verschiedenen visuellen Objekteigenschaften lokal und parallel verarbeitet, und im Rahmen von dimensionspezifischen Merkmalskarten (engl. "feature maps")⁵⁵⁹ detektiert. Danach werden in einem langsamen, attentiven Prozeß die verschiedenen visuellen Objekteigenschaften seriell zu einem Objekt integriert, indem die Zuwendung der Aufmerksamkeit (engl. "focal attention")⁵⁶⁰ auf einen Ort der Hauptkarte (engl. "master map of locations")⁵⁶¹ gerichtet ist, und damit die in den einzelnen Merkmalskarten am entsprechenden Ort registrierten Objektmerkmale bindet, wobei allerdings der Fokus der Aufmerksamkeit sich nur auf einen kleinen

558 Grundlegend s. z.B. A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. PP. 97-136, v.a. PP. 98-101 – A. TREISMAN: Features and Objects in Visual Processing. *Scientific American*. Vol. 254. 1986. PP. 114-25, v.a. PP. 124-25 – A. TREISMAN: Features and Objects. The Fourteenth Bartlett Memorial Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Vol. 40A. 1988. PP. 201-37 – A. TREISMAN / S. SATO: Conjunction Search Revisited. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*. Vol. 16. 1990. PP. 459-78, v.a. PP. 459-61, 474-77 – A. TREISMAN: The Perception of Features and Objects. In: A. BADDELEY / L. WEISKRANTZ: *Attention: Selection, Awareness & Control. A Tribute to Donald Broadbent*. Clarendon Press. Oxford. 1993. PP. 5-35, v.a. PP. 5-6, 16-22, 22-27, 28-32 – A. TREISMAN: The Binding Problem. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 6. No. 2. 1996. PP. 171-78 mit diversen Modifikationen der Theorie (z.B. PP. 173-74) – A. TREISMAN: Feature Binding, Attention and Object Perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*. Vol. 353. 1998. PP. 1295-1306, v.a. PP. 1296-97 – A. TREISMAN: Solutions to the Binding Problem: Progress through Controversy and Convergence. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 105-10 – A. TREISMAN: Object Tokens, Binding, and Visual Memory. In: H.D. ZIMMER / A. MECKLINGER / U. LINDENBERGER (Eds.): *Handbook of Binding and Memory. Perspectives from Cognitive Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford u.a. 2006. PP. 315-38.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.463.

Eine Kritik daran ist z.B. von J.M. WOLFE: *Visual Search*. In: H. PASHLER (Ed.): *Attention*. Hove/UK. Psychological Press. 1998. PP. 14-73 mit seiner sog. "Guided Search Theory (GST)" und von J. DUNCAN / G.I. HUMPHREYS: *Visual Search and Stimulus Similarity*. *Psychological Review*. Vol. 96. 1989. PP. 433-58 – J. DUNCAN / G.I. HUMPHREYS: *Beyond the Search Surface. Visual Search and Attentional Engagement*. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*. Vol. 18. 1992. PP. 578-88 mit ihrer sog. "Attentional Engagement Theory (AET)" vorgebracht worden.

S. auch M.C. TACCA: *Seeing Objects: The Structure of Visual Representation*. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 61-62.

559 S. z.B. A. TREISMAN: Features and Objects. The Fourteenth Bartlett Memorial Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Vol. 40A. 1988. PP. 202-204 – A. TREISMAN: Features and Objects in Visual Processing. *Scientific American*. Vol. 254. 1986. PP. 124-25 – A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. P. 131.

560 S. z.B. A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. PP. 98, 99, 130.

561 S. z.B. A. TREISMAN: Features and Objects. The Fourteenth Bartlett Memorial Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Vol. 40A. 1988. PP. 202-204, v.a. P. 203 – A. TREISMAN: Features and Objects in Visual Processing. *Scientific American*. Vol. 254. 1986. PP. 124-25.

(Orts-)Bereich richten kann (sog. "spotlight theory")⁵⁶². Sofern ein gespeichertes (Vor-)Wissen oder eine gerichtete Aufmerksamkeit fehlt, werden die Merkmale von verschiedenen Objekten nach Zufall kombiniert, sodaß sog. „illusionäre Verbindungen“ (engl. "illusory conjunctions")⁵⁶³ entstehen können. Die experimentellen Belege entstammen dabei dem wahrnehmungspsychologischen Paradigma der sog. „visuellen Suche“ (engl. "visual search")⁵⁶⁴, wonach dem Probanden die Aufgabe vorgegeben ist, möglichst schnell zu entscheiden, ob ein Zielreiz (engl. "target") in einer Menge von sog. „Distraktoren“ (engl. "distractors")⁵⁶⁵ dargeboten wird oder nicht, wobei sich der Zielreiz entweder durch ein einfaches Merkmal unterscheidet (engl. "simple feature search") oder durch eine Kombination von Merkmalen (engl. "feature conjunction search").

3.33 Zu Beginn der neunziger Jahre des 20. Jhdts. hatten dann in der (Neuro-)Biologie und der komputationalen Neurowissenschaft der englische Physiker und Biologe Francis CRICK und der U.S.-amerikanische Physiker und theoretische Neurowissenschaftler Christoph KOCH⁵⁶⁶ ein Modell der neuronalen Syn-

562 S. z.B. A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. PP. 132-34, die sich dabei auf M. POSNER / C.R. SNYDER / J.R. DAVIDSON: Attention and the Detection of Signals. *Journal of Experimental Psychology: General*. Vol. 109. 1980. PP. 160-74, v.a. PP. 171-72 berufen, die ihrerseits dabei auf D.A. NORMAN: Toward a Theory of Memory and Attention. *Psychological Review*. Vol. 75. 1968. PP. 522-36 verweisen.

563 S. z.B. A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. PP. 98, 100 mit Verweis auf A. TREISMAN: Focused Attention in the Perception and Retrieval of Multidimensional Stimuli. *Perception and Psychophysics*. Vol. 22. 1977. PP. 1-11, v.a. PP. 1-4.

S. im einzelnen z.B. A. TREISMAN / H. SCHMIDT: Illusory Conjunctions in the Perception of Objects. *Cognitive Psychology*. Vol. 14. 1982. PP. 107-41 – A. TREISMAN: Feature Binding, Attention and Object Perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences*. Vol. 353. 1998. PP. 1297-99.

Kritisch hierzu s. z.B. Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 97 – J.M. WOLFE / K.R. CAVE: The Psychophysical Evidence for a Binding Problem in Human Vision. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 11-17, v.a. PP. 11-15.

564 S. z.B. A. TREISMAN / G. GELADE: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. P. 99 – A. TREISMAN: Feature Binding, Attention and Object Perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences*. Vol. 353. 1998. PP. 1299-1300.

565 Unter dem Begriff des sog. „Distraktors“ (engl. "distractors") versteht man in der experimentellen Psychologie eine vermeintlich richtige, aber tatsächlich falsche (Antwort-)Alternative auf einen bestimmten Reiz im Rahmen einer Mehrfachwahlaufgabe, abgeleitet von engl. to distract (dt.: ablenken, verwirren, stören).

S. hierzu z.B. H. STAPF: Dorsch Psychologisches Wörterbuch. 15. Aufl. Verlag Hans Huber, Hogrefe AG. Bern. 2009. S. 223.

566 S. grundlegend Fr. CRICK / Chr. KOCH: Towards a Neurobiological Theory of Consciousness. *Seminars in the Neurosciences*. Vol. 2. 1990. PP. 263-75, v.a. PP. 269, 270-71, 271-75, die sich dabei auf die empirischen Befunde aus der Neurophysiologie, z.B. bei W. SINGER et al., W.J. FREEMAN und R. ECKHORN et al. (s. Kap. 3.34), die experimentellen Befunde aus der Wahrnehmungspsychologie, z.B. bei A. TREISMAN (s. Kap. 3.32), und auf das Modell von Chr. von der MALSBURG aus der Neuroinformatik stützen (s. Kap. 3.31).

In Fr. CRICK / Chr. KOCH: A Framework for Consciousness. *Nature Neuroscience*. Vol.6. 2003. PP. 119-26, v.a. P. 123 bestreiten die Autoren jedoch, daß die synchronen Oszillationen von Neuronen eine hinreichende Bedingung für ein neuronales Korrelat des Bewußtseins seien: "We no longer think that synchronized firing, such as the so-called 40 Hz oscillations, is a sufficient condition for the NCC."

S. auch G. TONONI / Chr. KOCH: The Neural Correlates of Consciousness: An Update. *Annals*

chronisation als einem zeitlichen Integrationsmechanismus zur Lösung des Bindungsproblems vorgeschlagen, und dieses auf die Diskussion um die neuronalen Korrelate des (visuellen) Bewußtseins (engl. "Neural Correlates of Consciousness (NCC)") angewendet (sog. „Neuronal Coalitions Theory“), wonach eine sensorische Information nur dadurch in das Bewußtsein gelangen könne, falls ein wahrgenommenes Objekt derart kodiert wird, daß die von dem Objekt aktivierten Neurone anhand einer kohärenten semi-synchronen Oszillation im Bereich von 40-70 Hz ihrer Impulse zu einem zeitlichen Verband, einem sog. "assembly"⁵⁶⁷, zusammengebunden werden, und dadurch ein Kurzzeitarbeitsgedächtnis aktiviert wird.

3.34 Seit der zweiten Hälfte der achtziger Jahre des 20. Jhdts hatte man in der (medizinischen) Neurophysiologie und der Neurobiologie experimentelle Daten zur Erforschung der synchronen Aktivität von Neuronen erhoben:

3.341 Mit Untersuchungen am visuellen Kortex von Katzen hatte vor allem die Forschungsgruppe um den Neurophysiologen Wolf SINGER mit seinen damaligen Mitarbeitern, dem Neurophysiologen Andreas K. ENGEL und dem Physiker und Neurophysiologen Peter KÖNIG, zusammen mit den Kollegen, wie z.B. C.M. GRAY, P. FRIES, A.K. KREITER, P.R. ROELFSEMA, S. NEUENSCHWANDER und M. BRECHT, die sog. „(Synchronizitäts-)Bindungshypothese“ (engl. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis")⁵⁶⁸ entwickelt, wonach präzise im Bereich von zehn bis zwanzig Millisekunden temporale Korrelationen zwischen den Impulsen von Neuronen und Stimulus-abhängige temporale Synchronisationen der kohärenten Aktivität von neuronalen Populationen, den sog. "assemblies"⁵⁶⁹, dazu beitragen, daß das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general) binding problem") gelöst werden könne, worauf in Kap. 3.4 ausführlich eingegangen wird.

3.342 Ebenfalls mit Untersuchungen am visuellen Kortex von Katzen⁵⁷⁰ anhand von Multi-Mikroelektroden⁵⁷¹ hat auch die Forschungsgruppe um den Physiker und Neurophysiologen Reinhard ECKHORN⁵⁷² im Rahmen einer "Binding-By-Syn-

New York Academy of Science. Vol. 1124. 2008. PP. 239-61.

Zu einem Synchronisations(-netzwerk-)modell (sog. "Coincidence Network") s. z.B. Chr. KOCH / H. SCHUSTER: A Simple Network Showing Burst Synchronization without Frequency Locking. *Neural Computation*. Vol. 4. 1992. PP. 211-23, v.a. PP. 213-15.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. H.G. SCHUSTER: *Bewusst oder unbewusst?* Wiley-VCH Verlag. Weinheim. 2007. S. 39-42.

567 S. Fr. CRICK / Chr. KOCH: A Framework for Consciousness. *Nature Neuroscience*. Vol.6. 2003. P. 121, die von "coalitions of neurons" sprechen.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.243, Fn. 522.

568 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.4, v.a. 3.423.

569 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.243, Fn. 522.

570 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.424.01.

571 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.11.

572 S. z.B. R. ECKHORN / R. BAUER / W. JORDAN / M. BROSCHE / M. KRUSE / M. MUNK / H.J. REITBOECK: Coherent Oscillations: A Mechanism for Feature Linking in the Visual Cortex? Multiple Electrode and Correlations Analyses in the Cat. *Biological Cybernetics*. Vol. 60. 1988. PP. 121-30 – R. ECKHORN / H.J. REITBOECK / M. ARNDT / P. DICKE: A Neural Network for Feature Linking via Synchronous Activity: Results from Cat Visual Cortex and from Simulations. In: R.M.J. COTTERILL (Eds.): *Models of Brain Function*. Cambridge University Press. Cambridge. 1989. PP. 255-72 – R. ECKHORN / T. SCHANZE / M. BROSCHE / W. SALEM / R. BAUER: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual

chronization Hypothesis"⁵⁷³ bzw. einer "Linking-By-Synchronization Hypothesis"⁵⁷⁴ eine synchron korrelierte oszillatorische Aktivität von Neuronen beobachtet, z.B. mit Bezug auf die Orientierungspräferenzen (engl. "orientation preferences") zwischen den verschiedenen visuellen Arealen innerhalb einer Hemisphäre, z.B. zwischen den Arealen 17, 18 und 19 bei Katzen, oder zwischen den beiden Hemisphären.⁵⁷⁵

3.343 Mit evozierten EEG-Potentialen⁵⁷⁶ beim Menschen hat die französische Neurobiologin Catherine TALLON-BAUDRY⁵⁷⁷ im Rahmen von kohärenten Objektrepräsentationen, z.B. eines Dalmatiners, eine erhöhte synchrone Aktivität von induzierten neuronalen Oszillationen im Gamma-(24-60 Hz) und Beta-(15-20 Hz) Band festgestellt, sodaß diese Synchronisation von neuronalen Oszillationen einen Mechanismus darstellen könne, um ein bestimmtes Objekt als Ganzes zu kodieren.

3.344 Ebenso präzise neuronale Synchronisationsphänomene hat der französi-

Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BAŞAR (Ed.): *Induced Rhythms in the Brain*. Springer-Verlag, New York, 1992. PP. 47-80 – A. FRIEN / R. ECKHORN / R. BAUER / T. WOELBERN / H. KEHR: Stimulus-Specific Fast Oscillations at Zero Phase Between Visual Areas V1 and V2 of Awake Monkey. *Neuroreport*. Vol. 5. 1994. PP. 2273-77 – R. ECKHORN / A. BRUNS / M. SAAM / A. GAIL / A. GABRIEL / H.J. BRINKSMeyer: Flexible Cortical Gammaband Correlations Suggest Neural Principles of Visual Processing. *Visual Cognition*. Vol. 8. 2001. PP. 519-30 – R. ECKHORN / A. GAIL / A. BRUNS / A. GABRIEL / B. AL-SHAIKHLI / M. SAAM: Phase Coupling Supports Associative Visual Processing – Physiology and Related Models. *Chaos and Complexity Letters*. Vol. 2. 2007. PP. 169-87.

Einführend s. z.B. V.G. HARDCASTLE: The Binding Problem. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Blackwell Publisher, Malden/MA, Oxford/UK, 1998. PP. 559-60 – G. BUZSÁKI: *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press, Oxford, New York, 2006. PP. 254-57.

573 S. z.B. R. ECKHORN / A. BRUNS / M. SAAM / A. GAIL / A. GABRIEL / H.J. BRINKSMeyer: Flexible Cortical Gammaband Correlations Suggest Neural Principles of Visual Processing. *Visual Cognition*. Vol. 8. 2001. P. 519.

574 S. z.B. R. ECKHORN / T. SCHANZE / M. BROSCHE / W. SALEM / R. BAUER: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BAŞAR (Ed.): *Induced Rhythms in the Brain*. Springer-Verlag, New York, 1992. P. 67.

575 S. z.B. R. ECKHORN / T. SCHANZE / M. BROSCHE / W. SALEM / R. BAUER: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BAŞAR (Ed.): *Induced Rhythms in the Brain*. Springer-Verlag, New York, 1992. PP. 60-69, 76.

576 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.12.

577 S. z.B. C. TALLON / O. BERTRAND / P. BOUCHET / J. PERNIER: Gamma-Range Activity Evoked by Coherent Visual Stimuli in Humans. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 7. 1995. PP. 1285-91 – C. TALLON-BAUDRY / O. BERTRAND / C. DELPUECH / J. PERNIER: Stimulus Specificity of Phase-Locked and Non-Phased-Locked 40 Hz Visual Responses in Human. *Journal of Neuroscience*. Vol. 16. 1996. PP. 4240-49 – C. TALLON-BAUDRY / O. BERTRAND / C. DELPUECH / J. PERNIER: Oscillatory Gamma-Band (30-70 Hz) Activity Induced by a Visual Search Task in Humans. *Journal of Neuroscience*. Vol. 17. 1997. PP. 722-24 – C. TALLON-BAUDRY / O. BERTRAND / C. DELPUECH / J. PERNIER: Induced Gamma-Band Activity During the Delay of a Visual Short-Term Memory Task in Humans. *Journal of Neuroscience*. Vol. 18. 1998. PP. 4244-54 – C. TALLON-BAUDRY / A. KREITER / O. BERTRAND: Sustained and Transient Oscillatory Responses in the Gamma and Beta bands in a Visual Short-Term Memory Task in Humans. *Visual Neuroscience*. Vol. 16. 1999. PP. 494-59 – C. TALLON-BAUDRY: Oscillatory Synchrony as a Signature for the Unity of Visual Experience in Humans. In: A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press, Oxford, 2003. PP. 153-67.

sche Tiermediziner und theoretische Neurowissenschaftler Gilles LAURENT⁵⁷⁸ im olfaktorischen System nachgewiesen, z.B. anhand von schnellen lokalen Feldpotential-Oszillationen (engl. "Local Field Potential (LFP)⁵⁷⁹ oscillations") im Frequenzbereich von 20-30 Hz bei der Honigbiene und der Heuschrecke.

3.345 Mit EEG- und EMG-Aufzeichnungen⁵⁸⁰ beim Menschen zusammen mit einer MRT-Analyse⁵⁸¹ der Daten hat der holländische (Bio-)Physiker Ad AERTSEN⁵⁸² dynamische Synchronisationsprozesse im Beta-Band (16-28 Hz) zwischen den kortikalen motorischen Arealen und der muskulären Aktivität belegt.

3.346 Mit Aufzeichnungen anhand von Mikroelektroden an hippokampalen Schnittpräparaten der CA1-Region bei der Ratte hat die Forschungsgruppe um den Neurophysiologen und -pharmakologen Roger D. TRAUB⁵⁸³ Synchronisationen von induzierten Feldpotential-Oszillationen im Gamma Frequenzband

578 S. z.B. G. LAURENT / H. DAVIDOWITZ: Encoding of Olfactory Information with Oscillating Neural Assemblies. *Science*. Vol. 265. 1994. PP. 1872-75, v.a. P. 1872 – G. LAURENT: Dynamical Representation of Odors by Oscillating and Evolving Neural Assemblies. *Trends in Neuroscience*. Vol. 19. 1996. PP. 489-96, v.a. P. 491 – K. MacLEOD / G. LAURENT: Distinct Mechanisms for Synchronization and Temporal Patterning of Odor-Encoding Neural Assemblies. *Science*. Vol. 274. 1996. PP. 976-79 – M. STOPFER / S. BHAGAVAN / B. SMITH / G. LAURENT: Impaired Odour Discrimination on Desynchronization of Odour-Encoding Neural Assemblies. *Nature*. Vol. 390. 1997. PP. 70-74, v.a. P. 70 – G. LAURENT: Olfactory Network Dynamics and the Coding of Multidimensional Signals. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 3. 2002. PP. 884-95 – J. PEREZ-ORIVE / O. MAZOR / G.C. TURNER / S. CASSENAER / R.I. WILSON / G. LAURENT: Oscillations and Sparsening of Odor Representations in the Mushroom Body. *Science*. Vol. 297. 2002. PP. 359-65, v.a. P. 359.
S. einführend z.B. G. BUZSÁKI: *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press. Oxford, New York. 2006. PP. 257-59.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.43.

579 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.11.

580 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.12.

581 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.13.

582 S. B. FEIGE / A. AERTSEN / R. KRISTEVA-FEIGE: Dynamic Synchronization Between Multiple Motor Areas and Muscle Activity in Phasic Voluntary Movements. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 84. 2000. PP. 2622-29.

Beim Makaken s. auch A. RIEHLE / S. GRÜN / M. DIESMANN / A. AERTSEN: Spike Synchronization and Rate Modulation Differentially Involved in Motor Cortical Function. *Science* 278. 1997. PP. 1950-53.

583 S. z.B. M.A. WHITTINGTON / R.D. TRAUB / G.R. JEFFERYS: Synchronized Oscillations in Interneuron Networks Driven by Metabotropic Glutamate Receptor Activation. *Nature*. Vol. 373. 1995. PP. 612-15 – R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON / I.M. STANFORD / J.G.R. JEFFERYS: A Mechanism for Generation of Long-Range Synchronous Fast Oscillations in the Cortex. *Nature*. Vol. 382. 1996. PP. 621-24 – R.D. TRAUB / G.R. JEFFERYS / M.A. WHITTINGTON: Fast Oscillations in Cortical Circuits. The MIT Press. Cambridge/MA. 1999 – R.D. TRAUB / N. KOPELL / A. BIBBIG / E.H. BUHL / F.E.N. LeBEAU / M.A. WHITTINGTON: Gap Junctions Between Interneuron Dendrites Can Enhance Synchrony of Gamma Oscillations in Distributed Networks. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 21(23). 2001. PP. 9378-86 – M.A. WHITTINGTON / H.C. DOHENY / R.D. TRAUB / F.E.N. LeBEAU / E.H. BUHL: Differential Expression of Synaptic and Nonsynaptic Mechanisms Underlying Stimulus-Induced Gamma Oscillations in Vitro. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 21(5). 2001. PP. 1727-38 – A. BIBBIG / R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON: Long-Range Synchronization of Gamma and Beta Oscillations and the Plasticity of Excitatory and Inhibitory Synapses: A Network Model. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 88. 2002. PP. 1634-54.

S. einführend z.B. G. BUZSÁKI: *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press. Oxford, New York. 2006. PP. 252-54.

(engl. "gamma-frequency field potential oscillations")⁵⁸⁴ nachgewiesen, und diese langreichweitigen Gamma-Oszillationen (engl. "long-range gamma oscillations") im Frequenzbereich von etwa 40-50 Hz und Beta-Oszillationen im Frequenzbereich von etwa 20-30 Hz an einem theoretischen Modell⁵⁸⁵ bestätigt.

584 S. R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON / I.M. STANFORD / J.G.R. JEFFERYS: A Mechanism for Generation of Long-Range Synchronous Fast Oscillations in the Cortex. *Nature*. Vol. 382. 1996. P. 623.

585 S. z.B. R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON / I.M. STANFORD / J.G.R. JEFFERYS: A Mechanism for Generation of Long-Range Synchronous Fast Oscillations in the Cortex. *Nature*. Vol. 382. 1996. PP. 622-23 – A. BIBBIG / H.J. FAULKNER / M.A. WHITTINGTON / R.D. TRAUB: Self-Organized Synaptic Plasticity Contributes to the Shaping of Gamma and Beta Oscillations in Vitro. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 21. 2001. PP. 9054-56 – A. BIBBIG / R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON: Long-Range Synchronization of Gamma and Beta Oscillations and the Plasticity of Excitatory and Inhibitory Synapses: A Network Model. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 88. 2002. PP. 1635-39.

3.4 EXKURS: INTEGRATION VON NEURONALEN INFORMATIONEN IN DER VISUELLEN PERZEPTION ANHAND DER (TEMPORALEN) SYNCHRONISATIONSHYPOTHESE⁵⁸⁶

3.40 Da in diesem Kapitel das Bindungsproblem mit Bezug auf die visuelle Informationsverarbeitung anhand der sog. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis" i.S. W. SINGER's, A.K. ENGEL's und P. KÖNIG's et al. im Rahmen der integrativen Mechanismen in der visuellen Szenenanalyse thematisiert wird, wird vorab ganz allgemein die neuroanatomische Architektur des visuellen Systems, vorwiegend orientiert an der beim Menschen bzw. bei den Primaten, kurz skizziert⁵⁸⁷ (s. Graphik.18): Die Verarbeitung von visueller Information beginnt mit der sich im Auge befindenden Netzhaut (sog. „Retina“ (engl. "retina")), die Photorezeptoren (engl. "photoreceptors") enthält, die die elektromagnetische Lichtenergie in neuronale Aktivität umwandeln (sog. „Phototransduktion“ (engl. "phototransduction")), wobei bereits eine umfangreiche Bildbearbeitung durchgeführt wird. Die Information der Photorezeptoren fließt nun über die Bipolarzellen zu den retinalen Ganglienzellen (engl. "retinal ganglion cells"), deren gebündelte Axone die jeweiligen Sehnerven der beiden Augen bilden, die, nachdem sie sich im sog. „Chiasma opticum“ (engl. "optic chiasm") (dt.: „Sehnervenkreuz-

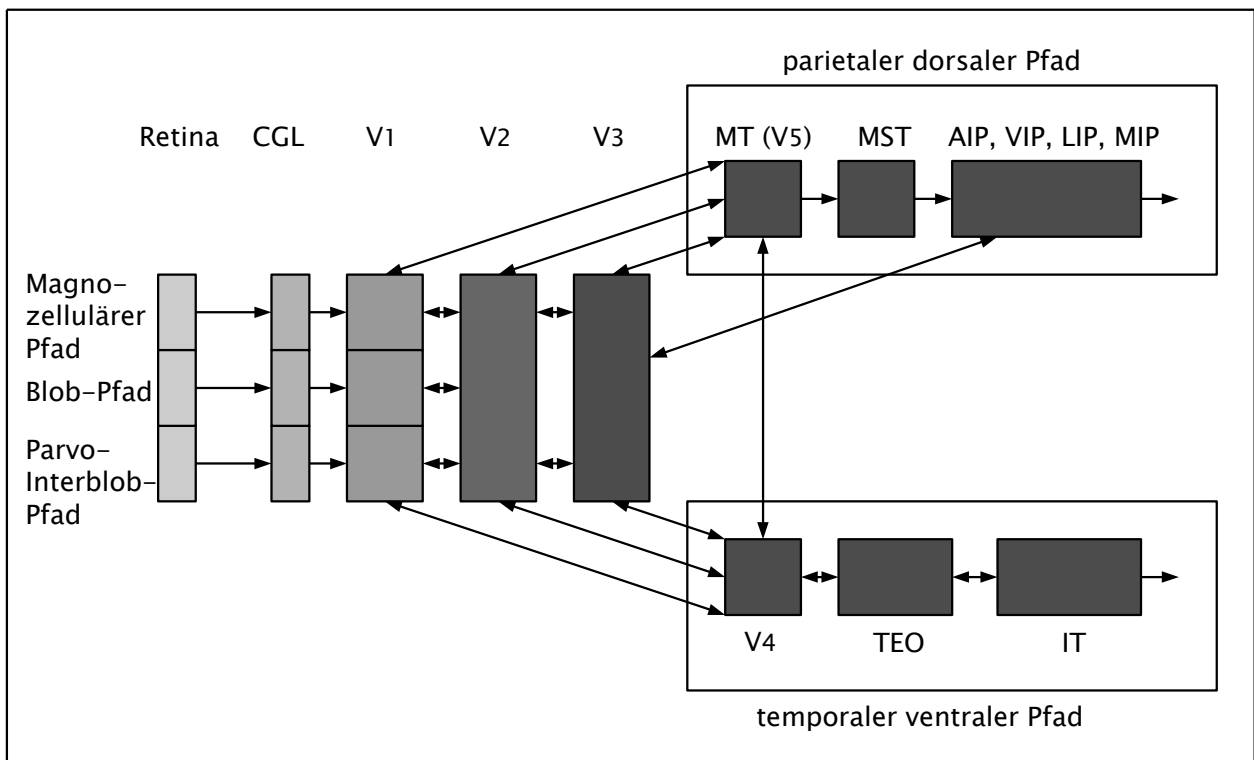
586 Der Gedankengang des Kapitels orientiert sich im wesentlichen an A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2012. S. 67-77, daneben auch an A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik. Wilhelm Fink Verlag, München. 2005. S. 16-41 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1998. S. 157-94 – A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 1996. S. 181-207.

587 Einführend vorwiegend mit Bezug auf den Menschen s. z.B. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2009. S. 303-37, 340-76 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL (Hrsg.): Neurowissenschaften. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996 S. 371-493 – Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2011. S. 67-77 – M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. PP. 177-88 – R.CI. REID / W.M. USREY: Vision. In: L. SQUIRE et al. (Eds.): Fundamental Neuroscience. 3rd Ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam, Heidelberg. 2008. PP. 637-59 – D. PURVES et al. (Eds.): Principles of Cognitive Neuroscience. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2008. PP. 113-45 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: Biopsychologie. 6. Aufl. Pearson Studium, München u.a. 2007. S. 165-99, 202-16.

Einführend vorwiegend mit Bezug auf die (Säuge-)Tiere s. z.B. K. KIRSCHFELD: Photorezeption (periphere Sehorgane). In: J. DUDEL / R. MENZEL / R.F. SCHMIDT (Hrsg.): Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2001. S. 385-405 – K.-P. HOFFMANN / C. WEHRHAHN: Zentrale Sehsysteme. In: J. DUDEL / R. MENZEL / R.F. SCHMIDT (Hrsg.): Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2001. S. 407-28 – S.M. BREEDLOVE / M.R. ROSENZWEIG / N.V. WATSON (Eds.): Biological Psychology. An Introduction to Behavioral, Cognitive, and Clinical Neuroscience. 6th Ed. Sinauer Associates. Sunderland/ MASS. 2010. PP. 285-319.

S. auch M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 54-56.

zung“) vereinigt bzw. gekreuzt haben, die neuronale Information in Form von Aktionspotentialen in die erste Schaltstation der Sehbahn, das sog. „Corpus Geniculatum Laterale (CGL)“ (engl. „Lateral Geniculate Nucleus (LGN)“) (dt.: „seitlicher Kniehöcker“) im dorsalen Thalamus projiziert (sog. „retinofugale Projektion“ (engl. „retifugal projection“)). Dabei wird die sensorische Information nicht durch ein einzelnes, hierarchisch organisiertes System verarbeitet, sondern anhand von (mindestens) drei parallelen, funktionell getrennten (Haupt-)Bahnen der visuellen Informationsverarbeitung, die sich auf die Verarbeitung von neuronaler Information über (1) Form und Tiefe (sog. „Parvo-Interblob-Pfad“



Graphik.18: Schematische, stark vereinfachte Darstellung der drei parallelen Informationsverarbeitungspfade des visuellen Systems beim Menschen bzw. bei den Primaten, dem sog. „magnozellularen Pfad“ (engl. „magnocellular pathway“), dem sog. „Blob-Pfad“ (engl. „blob pathway“) und dem sog. „Parvo-Interblob-Pfad“ (engl. „parvo-interblob pathway“), beginnend bei der sog. „Retina“ (engl. „retina“), über das sog. „Corpus geniculatum laterale“ (CGL) (engl. „lateral geniculate nucleus (LGN)“) hin zu dem primären (V1), sekundären (V2), und tertiären (V3) visuellen Kortex (engl. „visual cortex“), und anschließend zu den beiden großen Pfaden der kortikalen, visuellen Weiterverarbeitung, sog. „dorsalen Pfad“ (engl. „dorsal pathway“) und dem sog. „ventralen Pfad“ (engl. „ventral pathway“) mit den entsprechenden kortikalen (Assoziations-)Arealen (s. Text) (in Anlehnung an E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): Principles of Neural Science. 5th Ed. McGraw-Hill, New York u.a. 2013. P. 470, M.S. GAZZANIGA / R.B. IVRY / G.R. MANGUN: The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009. P. 181, M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 363, 367 und Fr. RÖSSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011. S. 70, 73).

(engl. "parvo-interblob pathway")), (2) Farbe (sog. „Blob-Pfad“ (engl. "blob pathway")), und (3) Bewegung und Tiefe (sog. „magnozellularer Pfad“ (engl. "magnocellular pathway")) spezialisiert haben, sodaß die in den drei getrennten Bahnen übertragene Information wieder zu einem einzigen (Wahrnehmungs-)Bild integriert werden muß. Die Axone der Neuronen des Corpus geniculatum laterale projizieren nun weiter in den primären visuellen Kortex (engl. "primary visual cortex") V1, auch striärer Kortex (engl. "striate cortex") genannt, der auf Grund der retinotopen Struktur der Projektionen eine vollständige Karte der Retina enthält (sog. „retinotopie Organisation“ (engl. "retinotopic organization")), und aus einer Vielzahl von funktionalen, kortikalen Modulen, den sog. „Hyperkolumnen“ (engl. "hypercolumns"), bestehend aus Augendominanz- und Orientierungssäulen (sog. „Kolumnen“ (engl. "columns")) sowie sog. „Blobs“ (engl. "blobs"), aufgebaut ist, die jeweils einen ganz bestimmten Punkt innerhalb des Gesichtsfeldes vollständig analysieren können. Von dort wird die neuronale Information weiterverarbeitet und auf eine Vielzahl von rückgekoppelten Verarbeitungswegen verteilt über verschiedene spezialisierte Areale in V2 und V3, um anschließend im wesentlichen auf zwei große Pfade der kortikalen, visuellen Weiterverarbeitung mit verschiedenen visuellen Funktionen zu münden, u.z., entweder in den sog. „dorsalen Pfad“ (engl. "dorsal pathway"), der für „die Analyse der visuellen Bewegung und die visuelle Kontrolle von Bewegungen zuständig zu sein scheint“⁵⁸⁸, oder in den sog. „ventralen Pfad“ (engl. "ventral pathway"), der „an der bewussten Wahrnehmung der visuellen Welt und der Wiedererkennung von Objekten beteiligt sein soll.“⁵⁸⁹ M.a.W. ist, stark vereinfachend ausgedrückt, „die dorsale Bahn entscheidend für die Wahrnehmung, ‚wo‘ sich Objekte befinden, die ventrale Bahn für die Wahrnehmung, ‚was‘ die Objekte sind.“⁵⁹⁰ Dem dorsalen Pfad werden dabei die folgenden Kortexareale zugewiesen: das *mediotemporale Areal* MT (engl. "middle temporal area") (V5), das *mediosuperior-temporale Areal* MST (engl. "medial superior temporal area") und weitere Areale im parietalen Kortex, wie z.B. das *anteriorintraparietale Areal* AIP (engl. "anterior intraparietal area"), das *ventral-intraparietale Areal* VIP (engl. "ventral intraparietal area"), das *lateral-intraparietale Areal* LIP (engl. "lateral intraparietal area"), und das *medial-intraparietale Areal* MIP (engl. "medial intraparietal area"), dem ventralen Pfad wird hingegen das Areal V4, das *temporal-okzipitale Areal* TEO (engl. "temporal-occipital area") und das *inferior-temporale Areal* IT (engl. "inferior temporal area") zugeordnet.

3.41 (ALLGEMEINE) BINDUNGSPROBLEMATIK IN DEN KOGNITIVEN NEUROWISSENSCHAFTEN

3.410 Die (allgemeine) Bindungsproblematik (engl. "(general) binding pro-

588 S. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 366-67.

589 S. Fn. 588.

590 J.P.J. PINEL / P. PAULI: Biopsychologie. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 212.

blem") in den (kognitiven) Neurowissenschaften⁵⁹¹ besteht im Auffinden von (generellen) Mechanismen der Integration von neuronalen Signal- und Informationsverarbeitungsprozessen, wodurch elementare sensorische Daten derart strukturiert werden, daß sie dadurch zu kohärenten Wahrnehmungseindrücken „gebunden“ (engl. "binding"), d.h. integriert, werden können. Nach dem Neurophysiologen Andreas K. ENGEL⁵⁹² stellen sich dabei aus der Sicht der kognitiven Neurobiologie, der Neurophysiologie und der Wahrnehmungs- und (kognitiven) Neuropsychologie – zumindest – im wesentlichen drei (Sub-)Probleme:

1. das Problem der intramodalen perzeptiven Integration, d.h.: Wie wird die Integration von Neuronenimpulsen innerhalb eines einzelnen sensorischen Systems bzw. einer einzelnen sensorischen Modalität, wie z.B. der visuellen Wahrnehmung, zu einheitlichen Wahrnehmungseindrücken geleistet?
2. das Problem der intermodalen Integration, d.h.: Wie wird die Integration von Neuronenimpulsen, die in verschiedenen sensorischen Systemen vorverarbeitet worden sind, geleistet, sodaß man die Information zu einheitlichen Wahrnehmungseindrücken zusammenfassen kann?
3. das Problem der sensomotorischen Integration, d.h.: Wie wird die Integration von Neuronenimpulsen der sensorischen mit denen der motorischen Informationsverarbeitung geleistet, sodaß die Sensorik mit der motorischen Aktivität koordiniert werden kann?

3.42 SENSORISCHE (KONTUREN-)SEGMENTATION IN DER VISUELLEN SZENENANALYSE

3.420 Im Zentrum der Diskussion um das erste (Sub-)Problem der intramodalen perzeptiven Integration steht das sog. „Problem der sensorischen (Konturen-)Segmentation“ (engl. "sensory segmentation problem")⁵⁹³ bzw. die sog. „Szenenanalyse“ (engl. "scene analysis")⁵⁹⁴ im Rahmen der visuellen Informationsverarbeitung: Die entscheidende Thematik besteht dabei darin festzustellen, welche neurophysiologischen (Integrations-)Mechanismen der (Objekt-)Merkmals- bzw. Eigenschaftsbindung (engl. "feature binding") und der psychologischen Gestaltbildung⁵⁹⁵ bei der Wahrnehmung der Umwelt aktiv sind, damit festgelegt wird, welche elementaren Objektmerkmale und Objektbereiche zusammengefaßt werden müssen, m.a.W. „gebunden“ werden müssen, um eine visuelle Situation angemessen analysieren und repräsentieren zu können.

3.421 Das klassische Modell der Ein(-zel-)zell(-en-)kodierung (engl. "single-cell

591 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.30.

592 S. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 68.

593 S. z.B. Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 101-102.

Einführend s. z.B. A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 181-207, v.a. S. 181-84.

594 Einführend s. z.B. W. SINGER: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 129-34.

595 S. hierzu eingehend Fn. 623 und 624.

coding")⁵⁹⁶, gegründet auf die im Jahre 1972 entworfene sog. „Ein(-zel-)zell(-en-)Doktrin“ (engl. „single-cell doctrine“) des britischen Neurophysiologen Horace BARLOW's⁵⁹⁷ vor dem Hintergrund des klassischen neurobiologischen Paradigmas mit seiner seriellen „Computermetapher“ in den sechziger und siebziger Jahren des 20. Jhdts.⁵⁹⁸, bestand nun darin, daß als neurophysiologisches Korrelat der psychologischen Gestaltbildung⁵⁹⁹ hochspezialisierte Bindungsneuronen anzunehmen seien, sog. „Kardinalzellen“ (engl. „cardinal cells“), auch als „Großmutterzellen“ (engl. „grandmother cells“)⁶⁰⁰ bezeichnet, wonach nicht nur elementare Objektattribute, sondern auch komplexe Objektattribute und Objekte, wie z.B. die eigene Großmutter, durch das Ansteigen der Feuerrate von einzelnen oder sehr wenigen Neuronen kodiert werden sollten, d.h. die zu bindenden neuronalen Signale würden somit über die konvergente Verschaltungsstruktur des visuellen Systems im Rahmen eines statischen Bindungsmodells (engl. „static binding model“)⁶⁰¹ zu diesen einzelnen sog. „Bindungseinheiten“, engl. „conjunction(-specific) units“ genannt, zusammengeführt werden, die dadurch auf der höchsten Stufe der Informationsverarbeitungshierarchie hochspezifische Antworteigenschaften hätten erzeugen können (sog. „binding by convergence“ oder sog. „binding by conjunction cells“, auch bekannt unter dem Kodierungsprinzip des sog. „labeled-

596 Einen Überblick hierzu bietet z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 157-63, v.a. S. 159-60 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 126.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 96-100 – W. SINGER: Vom Gehirn zum Bewußtsein. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 68-69 – W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 152-55 – W. SINGER: Das Gehirn – ein Orchester ohne Dirigent. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft. Bd. 2. 2005. S. 16.

597 S. H.B. BARLOW: Single Units and Sensation: A Neuron Doctrine for Perceptual Psychology. Perception. Vol. 1. 1972. PP. 371-94, v.a. PP. 380-81, 382-88, 390.
Einführend s. z.B. G. BUZSÁKI: Rhythms of the Brain. Oxford University Press. Oxford, New York. 2006. PP. 234-38 – M.R. BENNETT / P.M.S. HACKER: History of Cognitive Neuroscience. Wiley-Blackwell. Malden/MA. 2008. PP. 18-22.

598 S. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 157-63, v.a. S. 158, 159-60, 164.

599 S. hierzu eingehend Fn. 624 und 625.

600 S. hierzu Ch.G. GROSS: Genealogy of the „Grandmother Cell“. The Neuroscientist. Vol. 8. 2002. PP. 512-18.

Einführend s. z.B. J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 376.

S. auch Chr. von der MALSBERG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. P. 1179, der diese Neuronen als sog. „combination-coding units“ bezeichnet.

601 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.30, Fn. 540.

line coding")⁶⁰².

3.422 Das zentrale Problem dieses statischen Modells besteht nun darin, daß es in Bezug auf die Anzahl der benötigten repräsentationalen Elemente zu einer sog. „kombinatorischen Explosion“ (engl. “combinatorial explosion”)⁶⁰³ kommen würde, da mit der Anzahl von erkennbaren Eigenschaften auch die Anzahl der möglichen Merkmalskombinationen „explodieren“ würde, sodaß dafür eine entsprechende Vielzahl von spezialisierten Neuronen zur Verfügung stehen müßte, von denen ein Großteil zudem für neue Konstellationen von Eigenschaften „in Reserve“ verbleiben müßte, was dem Ökonomieprinzip (engl. “economy principle”) in der Evolutionsbiologie widerspräche.⁶⁰⁴ Ferner fanden sich keine experimentellen Belege für die erwähnten „Großmutterzellen“, abgesehen von Arbeiten zur Gesichtserkennung, z.B. bei R. DESIMONE, T.D. ALBRIGHT, C.G. GROSS und C. BRUCE⁶⁰⁵, bei C.G. GROSS, C.E. ROCHA-MIRAN-

602 S. z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1136 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-50.

Einführend s. z.B. A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 25-32.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.22, Fn. 551.

603 S. hierzu z.B. L.I. PERLOVSKY: Conundrum of Combinatorial Complexity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 20. 1998. PP. 666-70, v.a. PP. 666, 668, 669 – T.J. SEJNOWSKI: Open Questions about Computation in Cerebral Cortex. In: D.E. RUMELHART / J.L. MCCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 372-89, v.a. P. 377.

S. auch W. SINGER / Ch.M. GRAY: Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*. Vol. 18. 1995. PP. 555-56.

604 Eingehend zu einer allgemeinen Kritik der Ein(-zel-)zell(-en-)kodierung s. z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1136 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung*. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 126 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): *Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften*. Suhrkamp. Frankfurt/M. S. 164 – A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 6-9.

Einführend hierzu s. z.B. W. SINGER: Vom Gehirn zum Bewußtsein. In: W. SINGER: *Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung*. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 68-69 – W. SINGER: *Der Beobachter im Gehirn*. In: W. SINGER: *Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung*. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 154-55 – W. SINGER: *Das Gehirn – ein Orchester ohne Dirigent*. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft. Bd. 2. 2005. S. 16.

605 S. R. DESIMONE / T.D. ALBRIGHT / C.G. GROSS / C. BRUCE: Stimulus-Selective Properties of Inferior Temporal Neurons in the Macaque. *Journal of Neuroscience*. Vol. 4. 1984. PP. 2051-62.

S. auch R. DESIMONE / L.G. UNGERLIEDER: Neural Mechanisms of Visual Processing in Monkeys. In: F. BOLLER / J. GRAFMAN (Eds.): *Handbook of Neurophysiology*. Vol. 2. Chapter 1. Elsevier. Amsterdam. PP. 267-99, v.a. PP. 286-88.

DA und D.B. BENDER⁶⁰⁶ oder bei N.K. LOGOTHETIS, J. PAULS und T. POGGIO⁶⁰⁷, die anhand ihrer Einzelzellableitungen herausfanden, daß einzelne Neurone durchaus auf ein bestimmtes Portrait feuern können.⁶⁰⁸

3.423 Seit den achtziger Jahren des 20. Jhdts ist demgegenüber das konnektionistische Modell der Populationskodierung (engl. "population coding")⁶⁰⁹ in der neurophysiologischen Wahrnehmungstheorie entwickelt worden, auch als

606 S. C.G. GROSS / C.E. ROCHA-MIRANDA / D.B. BENDER: Visual Properties of Neurons in Inferotemporal Cortex of the Macaque. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 35. 1972. PP. 96-111.

607 S. z.B. N.K. LOGOTHETIS / J. PAULS / T. POGGIO: Shape Representation in the Inferior Temporal Cortex of Monkeys. *Current Biology*. Vol. 5. 1995. PP. 552-63.

S. auch M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 1019-25.

608 S. hierzu auch die Zurückweisung der „Wiederbelebung“ des „Grandmother-Cell“ Coding i.S.v. J.S. BOWERS: On the Biological Plausibility of Grandmother Cells: Implications for Neural Network Theories in Psychology and Neuroscience. *Psychological Review*. Vol. 116. 2009. PP. 220-51 und J.S. BOWERS: More on Grandmother Cells and the Biological Implausibility of PDP Models of Cognition: A Reply to Plaut and McClelland (2010) and Quian Quiroga and Kreiman (2010). *Psychological Review*. Vol. 117. 2010. PP. 300-308 durch D.C. PLAUT / J.L. McCLELLAND: Locating Object Knowledge in the Brain: A Critique of Bower's (2009) Attempt to Revive the Grandmother Cell Hypothesis. *Psychological Review*. Vol. 117. 2010. PP. 284-90, v.a. PP. 285-86: "In fact, it is not possible to establish definitively that a neuron responds to "one thing" without testing it on all possible things; the best that can be done is to estimate a degree of sparsity in the neural response within the sampled subset of stimuli. It is interesting to note that Quian Quiroga, Kreiman, Koch, and Fried (2008) have done just this in their analysis of response properties of single neurons in human hippocampus. On the basis of the pattern of response that they saw, they estimated that each familiar pattern may activate about two out of every 1,000 neurons in the hippocampus and other areas in the medial temporal lobe (MTL). Although this seems a small number, they note that with about 1 billion neurons in the MTL, this means that around 2 million neurons participate in the pattern associated with every object. From this and further considerations, they concluded that each MTL neuron may respond to 50-150 different objects. It may be noted that the hippocampus is thought to use very sparse representations compared with other regions of the brain. Thus, it seems likely that most neurons participate in representing at least hundreds of objects."

S. hierzu R. QUIAN QUIROGA / G. KREIMAN / C. KOCH / I. FRIED: Sparse but not "Grandmother-Cell" Coding in the Medial Temporal Lobe. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 12. 2008. PP. 87-91 und R. QUIAN QUIROGA / G. KREIMAN: Measuring Sparseness in the Brain: Comment on Bowers (2009). *Psychological Review*. Vol. 117. 2010. PP. 291-99.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.25.

609 Einen eingehenden Überblick hierzu bietet z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1136-37 – W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 82 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-50.

Einen einführenden Überblick hierzu bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 68-71 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): *Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften*. Suhrkamp. Frankfurt/M. S. 163-72 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung*. Suhrkamp Verl. Frankfurt/ M. 1996. S. 123-29 – A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistun-*

sog. „Assembly Modell“ (engl. „assembly model“) bezeichnet⁶¹⁰, das darin besteht, daß die elementaren Objektattribute und die komplexen Objekte im visuellen Kortex anhand von Populationen von synchron aktiven Neuronen, den sog. „assemblies“⁶¹¹, repräsentiert werden: Nach der (Synchronizitäts-)Bindungshypothese (engl. „Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis“)⁶¹² der Neuro-

gen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996, S. 200-203 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: C.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik. Wilhelm Fink Verl. München, 2005, S. 222-24.

Einen allgemeinverständlichen Überblick bietet z.B. W. SINGER: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002, S. 129-38 – W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002, S. 100-11 – W. SINGER: Vom Gehirn zum Bewußtsein. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002, S. 65-70 – W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002, S. 144-70 – W. SINGER: Unser Menschenbild im Spannungsfeld von Selbsterfahrung und neurobiologischer Fremdbeschreibung. KIZ Univ. Ulm. Ulm, 2003, S. 23-26 – W. SINGER: Das Gehirn – ein Orchester ohne Dirigent. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft, Bd. 2, 2005, S. 16 – A.K. ENGEL / W. SINGER: Neuronale Grundlagen der Gestaltwahrnehmung. In: Spektrum der Wissenschaften. Dossier 4/97 „Kopf und Computer“. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997, S. 66-73 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Bildung repräsentationaler Zustände im Gehirn. In: Spektrum der Wissenschaften. Hf. 9, 1993, S. 42-47.

Bisweilen wird auch die Bezeichnung „assembly coding“ verwendet, z.B. bei W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press, Cambridge/MA, London, 1999, P. 82.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.24.3.

610 S. z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012, PP. 70, 71 – W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press, Cambridge/MA, London, 1999, P. 82.

Die englische Bezeichnung „(cell) assembly“ bzw. „(cell) assemblies“, abgeleitet von engl. „to assemble“ (dt. „zusammensetzen, zusammenbauen“), geht dabei auf den kanadischen Psychologen Donald O. HEBB zurück.

S. hierzu z.B. D.O. HEBB: The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. Wiley-Interscience, New York, 1949, PP. 69-74.

Nach A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp, Frankfurt/M. 1998, S. 167. Fn. 21 bezeichnet man in der Neurophysiologie mit dem Begriff „Assembly“ „eine Population von dynamisch wechselwirkenden Neuronen, die als Ganzes eine Objektrepräsentation instantiiert.“

S. eingehend z.B. G. PALM: Neural Assemblies. An Alternative Approach to Artificial Intelligence. Springer-Verlag, Berlin u.a. 1982.

Eine eingehende Übersicht hierzu bietet z.B. V. BRAITENBERG: Cell Assemblies in the Cerebral Cortex. In: R. HEIM / G. PALM (Eds.): Lecture Notes in Biomathematics. Vol. 21. Theoretical Approaches to Complex Systems. Springer-Verlag, Berlin, 1978, PP. 171-88 – G.L. GERSTEIN / P. BEDENBAUGH / A. AERTSEN: Neuronal Assemblies. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol. 36, 1989, PP. 4-14 – G. PALM: Cell Assemblies as a Guideline for Brain Research. Concepts in Neuroscience. Vol. 1, PP. 133-37 – G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books, New York, 1987, PP. 20-22.

611 S. Fn. 609, 610.

physiologen Wolf SINGER⁶¹³ und Andreas K. ENGEL⁶¹⁴ sowie dem Physiker und Neurophysiologen Peter KÖNIG⁶¹⁵ et al. hat man diese Zellverbände von kohärent aktiven Neuronen als die grundlegenden Einheiten der Informationsverarbeitung im Kortex zu betrachten, d.h. sie stellen eine basale deskriptive und funktionelle Kategorie in der kognitiven Neurobiologie und der medizinischen

612 Grundlegend zur sog. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis" s. z.B. C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in Orientation Columns of Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 86. 1989. PP. 1698-1702 – C.M. GRAY / P. KÖNIG / A.K. ENGEL / W. SINGER: Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex Exhibit Inter-Columnar Synchronization which reflects Global Stimulus Properties. *Nature*. Vol. 338. 1989. PP. 334-37 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 2. 1990. PP. 588-606 – W. SINGER: Search for Coherence: A Basic Principle of Cortical Self-Organization. *Concepts in Neuroscience*. Vol. 1. 1990. PP. 1-26 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / Ch.M. GRAY / W. SINGER: Synchronization of Oscillatory Responses: A Mechanism for Stimulus-Dependent Assembly Formation in Cat Visual Cortex. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science Inc. New York. 1990. PP. 105-108 – W. SINGER / C. M. GRAY / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / A. ARTOLA / S. BRÖCHER: Formation of Cortical Cell Assemblies. In: *The Brain*. Cold Spring Harbor. Cold Spring Harbor Laboratory Press. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. Vol. 55. 1990. PP. 939-52 – W. SINGER: Synchronization of Cortical Activity and its Putative Role in Information Processing and Learning. *Annual Review of Physiology*. Vol. 55. 1993. PP. 349-74 – W. SINGER / C. M. GRAY: Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis. *Annual Review of Neuroscience*. Vol. 18. 1995. PP. 555-86 – P. KÖNIG / A.K. ENGEL / P.R. ROELFSEMA / W. SINGER: How Precise is Neuronal Synchronization? *Neural Computation*. Vol. 7. 1995. PP. 469-85 – W. SINGER: Neuronal Synchronization: A Solution to the Binding Problem. In: R. LLINAS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): *The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes*. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 100-30 – W. SINGER / A.K. ENGEL / A.K. KREITER / M.H.J. MUNK / S. NEUENSCHWANDER / P.R. ROELFSEMA: Neuronal Assemblies: Necessity, Signature and Detectability. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 1. 1997. PP. 252-61 – A.K. ENGEL / P. FRIES / W. SINGER: Dynamic Predictions: Oscillations and Synchrony in Top-Down Processing. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 2. 2001. PP. 704-16 – A.K. ENGEL / W. SINGER: Temporal Binding and the Neural Correlates of Sensory Awareness. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 5. 2001. PP. 16-25.

Eine eingehende Einführung hierzu bietet z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1136-43 – W. SINGER: Synchronization of Neuronal Responses as a Putative Binding Mechanism. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 960-64 – W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 81-84 – W. SINGER: Neuronal Synchrony as a Binding Mechanism. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 10569-72 – A.K. ENGEL: Gamma Oscillations. In: P. WILKEN / A. CLEEREMANS / T. BAYNE (Eds.): *Oxford Companion to Consciousness*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2009. PP. 321-27 – J.E. HUMMEL: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 85-86 – Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-80 – J.I. NELSON: Binding in the Visual System. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 157-59 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 49-58.

Neurophysiologie dar.⁶¹⁶ Das damit einhergehende neue konnektionistische (Wahrnehmungs-)Paradigma betont nach A.K. ENGEL und P. KÖNIG⁶¹⁷, daß die Struktur in neuronalen Netzwerken als das Resultat von Selbstorganisationsprozessen aufzufassen sei, und daher vor allem die dynamischen, d.h. die zeitlichen Netzwerkeigenschaften von sensorischen Systemen zu berücksichtigen seien.⁶¹⁸ Deshalb ist von W. SINGER⁶¹⁹ und seinen damaligen Mitarbeitern am

Einen eingehenden Überblick hierzu bietet z.B. C.M. GRAY / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Mechanisms Underlying the Generation of Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex. In: E. BAŞAR / T.H. BULLOCK (Eds.): *Induced Rhythms in the Brain*. Birkhäuser. Boston, Basel, Berlin. 1992. PP. 29-45 – W. SINGER: The Role of Synchrony in Neocortical Processing and Synaptic Plasticity. In: F. DOMANY / J.L. van HEMMEN / K. SCHULTEN (Eds.): *Models of Neural Networks II. Temporal Aspects of Coding and Information Processing in Biological Systems*. Ch. 4. Springer-Verlag. New York u.a. 1994. PP. 141-73 – W. SINGER: Coherence as an Organizing Principle of Cortical Functions. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): *Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology*. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 153-83 – Ch.M. GRAY: Synchronous Oscillations in Neuronal Systems: Mechanisms and Functions. *Journal of Computational Neuroscience*. Vol. 1. 1994. PP. 11-38 – W. SINGER: Neuronal Synchronization: A Solution to the Binding Problem. In: R.R. LLINÁS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): *The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes*. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 100-30 – W. SINGER: Response Synchronization, a Neural Code for Relatedness. In: J.J. BOLHUIS (Ed.): *Brain, Perception, Memory. Advances in Cognitive Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2000. PP. 35-48 – W.A. FREIWALD / A.K. KREITER / W. SINGER: Synchronization and Assembly Formation in the Visual Cortex. In: M.A.L. NICOLELIS (Ed.): *Advances in Neural Population Coding*. Elsevier. Amsterdam. 2001. PP. 111-40.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. W. SINGER: Das Bild im Kopf – ein Paradigmenwechsel. In: D. GANTEN (Hrsg.): *Gene, Neurone, Qubits & Co. Unsere Welten der Information*. Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte. Stuttgart, Heidelberg. 1999. S. 267-78, v.a. S. 272-75 – A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 200-205 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: C.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 16-41 – A.K. ENGEL / W. SINGER: Neuronale Grundlagen der Gestaltwahrnehmung. In: *Spektrum der Wissenschaften. Dossier 4/97 „Kopf und Computer“*. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg. 1997. S. 66-73.

613 Zur Person Wolf SINGER's siehe die Website www.mpiph-frankfurt.mpg.de/global/Np/Staff/singer_d.htm.

614 Zur Person Andreas K. ENGEL's siehe die Website www.40hz.net/.

615 Zur Person Peter KÖNIG's siehe die Website www.cogsci.uniosnabrueck.de/NBP/peterhome.html.

616 S. A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): *Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften*. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 167.

617 Dieses neue konnektionistische (Wahrnehmungs-)Paradigma in der Neurobiologie läßt sich nach A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): *Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften*. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 163-72 an fünf Konzeptelementen aufzeigen:

- (1) Parallele und verteilte Verarbeitung,
- (2) Selbstorganisation und Plastizität,
- (3) Kontextabhängigkeit neuronaler Antworten,
- (4) Assemblies als grundlegende funktionelle Einheiten und
- (5) Dynamik der neuronalen Verarbeitung.

618 S. z.B. J.E. HUMMEL: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 85-86.

619 Nach W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER:

Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt am Main, v.a. A.K. ENGEL und P. KÖNIG, ein zeitlicher Integrationsmechanismus⁶²⁰ für die Lösung des visuellen Integrationsproblems vorgeschlagen worden: Die sog. „(Zell-)Assembly Hypothese“ (engl. “cell assembly hypothesis”)⁶²¹ besagt, daß diejenigen von demselben Objekt aktivierten sensorischen Neuronen durch eine temporale (Phasen-)Synchronisation⁶²² ihrer elektrischen Impulse von wenigen tausendstel Se-

Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 103-105 kann man sechs sog. „Basispostulate“ zur experimentellen Überprüfung der (Bindungs-)Hypothese aufstellen: „Erstens, die Repräsentation von Wahrnehmungsobjekten erfolgt nicht nur explizit durch hochspezifische Neurone, sondern auch implizit über dynamisch assoziierte Ensembles von Zellen. Zweitens, diese dynamische Assoziation erfolgt über einen selbstorganisierenden Prozeß auf der Basis interner Wechselwirkungen, die durch Verbindungen der zweiten Klasse vermittelt werden. Drittens, die Regeln (die Gestaltregeln) für die bevorzugte Assoziation bestimmter Nervengruppen werden über die Architektur des Netzwerkes assoziierender Verbindungen festgelegt. Viertens, diese Architektur ist zum Teil genetisch festgelegt und zum Teil durch Erfahrung überformt. Fünftens, erfolgreiches Gruppieren von Zellen zu Ensembles drückt sich in der Synchronisation der Entladungstätigkeit der respektiven Neurone aus. Sechstens, aufgrund dieser spezifischen Synchronisationsmuster werden Ensembles abgrenzbar und als Einheiten identifizierbar.“

620 Der Ansatz, daß das Bindungsproblem anhand eines zeitlichen Integrationsmechanismus gelöst werden könnte, geht zurück auf Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981 – M. ABELES: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer Verl. Berlin. 1982 – P. MILNER: A Model for Visual Shape Recognition. Psychological Review. Vol. 81. 1974. PP. 521-35.

621 Einführend hierzu s. z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 70, 71.

622 Zum Begriff der sog. Phasensynchronisation (engl. “phase synchronization”) s. die Ausführungen in Kap. 3.424.04.

Eine eingehende allgemeine Einführung hierzu bieten z.B. Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Neuroscience. Vol. 2. 2001. PP. 229-37, v.a. P. 230 – H. WALTER: Die neuronalen Grundlagen des Bewusstseins. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. S. 559-60.

S. hierzu im einzelnen auch P. KÖNIG / A.K. ENGEL / P.R. ROELFSEMA / W. SINGER: How Precise is Neuronal Synchronization? Neural Computation. Vol. 7. 1995. PP. 469-85.

S. z.B. T. WOMELSDORF / J.-M. SCHOELEN / R. OOSTENVELD / W. SINGER / R. DESIMONE / A.K. ENGEL / P. FRIES: Modulation of Neuronal Interactions through Neuronal Synchronization. Science. Vol. 316. 2007. PP. 1609-12, v.a. P. 1611: “We provided evidence suggesting that neuronal interactions mechanistically depend on the phase relation between rhythmic activities. The most likely reason for this dependence is that rhythmic activities modulate the gain of incoming synaptic input rhythmically. Effective connectivity can thus be maximized or minimized through synchronization at a good or bad phase relation. The impact of pyramidal cells could be enhanced, for example, if their firing phase relative to interneurons were advanced (...) or if interneuronal firing were delayed through inhibition or reduced excitation (...). Such mechanisms might be invoked directly by cognitive top-down control.

Effective connectivity would diminish when synchronization is less precise, because then synaptic input is more likely to arrive at random phases. This mechanism has the advantage that within a sufficiently wide frequency band, multiple groups can be desynchronized, with respect to a given target group, without being necessarily synchronized to each other. Periods of putative interactions between distant neuronal groups are marked by an increased precision of synchronization (...).

We propose that the pattern of synchronization (its precision, phase, or both) weights the ana-

kunden zu Populationen von Neuronen, eben den sog. „(Zell-)Assemblies“ (engl. “cell assembly”), zusammengebunden werden könnten, derart, daß die Zusammengehörigkeit der Merkmale einer Sache oder eines Sachverhalts anhand dieser zeitlichen Korrelationen zwischen den Neuronen(-impulsen) eines Assemblies kodiert bzw. repräsentiert wird, und sie auf diese Weise bewirken, daß ein kohärentes Perzept konstruiert werden kann, indem z.B. im Rahmen der sog. „visuellen Szenenanalyse“ (engl. “visual scene analysis”)⁶²³ eine angemessene Zuordnung von Konturen zu einem bestimmten Objekt vorgenommen werden könnte, m.a.W., die synchrone Aktivität derjenigen Neurone, die demselben Zellverband angehören, wäre verantwortlich für die ganzheitliche Gestaltstruktur⁶²⁴ der visuellen Wahrnehmungseindrücke im Sinne der sog. „Gestaltpsychologie“ (engl. “Gestalt psychology”) der zwanziger und dreißiger Jahre des 20. Jhdt.'s nach den Psychologen Max WERTHEIMER, Wolfgang KÖHLER und Kurt KOFFKA.⁶²⁵

tomical-connection infrastructure with a gain pattern, resulting in an effective interaction pattern.”

Einen einführenden Überblick über das Problem der Phasenbindung in Zusammenhang mit dem Gamma-Band geben z.B. C. BAŞAR-EROĞLU / E. HOFF / D. STRÜBER / M.A. STADLER: Multistabile Phänomene in der Neurokognitionforschung. In: G. SCHIEPEK (Hrsg.): Neurobiologie der Psychotherapie. Studienausgabe. Schattauer. Stuttgart. (2003) 2004. S. 349-64, v.a. S. 358-60.

623 S. eingehend z.B. D.L. WANG: Visual Scene Segmentation. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 2002. PP. 1215-19 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Direct Physiological Evidence for Scene Segmentation by Temporal Coding. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 88. 1991. PP. 9136-40.

S. allgemeinverständlich einführend z.B. W. SINGER: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 129-30.

624 Eine schematische Darstellung der elementaren sog. „Gestaltkriterien“ (engl. “Gestalt criteria”) einer visuellen Szene, anhand derer die Gesetzmäßigkeiten der perzeptiven Integration(-smechanismen) auf der psychologischen Ebene beschrieben werden können, wird in A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 70 und in A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 1996. S. 183, 184 aufgeführt.

S. hierzu auch W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 87-89 – W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 160-62 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 171-72.

S. auch Fn. 625.

625 Die wichtigsten sog. „Gestaltkriterien“ (engl. “Gestalt criteria”) bzw. „Gestaltgesetze“ (engl. “Gestalt laws”) sind das Gesetz der/des:

- (1) Kontinuität (engl. “continuity”),
- (2) Nähe (engl. “proximity”),
- (3) Ähnlichkeit (engl. “similarity”),
- (4) gemeinsamen Schicksals (engl. “common fate”),
- (5) Geschlossenheit (engl. “closure”),
- (6) guten Fortsetzung (engl. “good continuation”),

Desweiteren besagt die sog. "cell assembly hypothesis"⁶²⁶, daß zwischen denjenigen Impulsen von Neuronen, die verschiedene elementare Objektattribute oder komplexe Objekte kodieren, eben keine solchen zeitlichen Korrelationen auftreten dürften, sodaß eindeutig festgelegt wäre, welche Teilmenge der aktiven Neurone jeweils zu demselben Assembly gehören würde, und daher diese Desynchronisation der verschiedenen Zellverbände die getrennte Weiterverarbeitung von zusammengehörigen neuronalen Informationen unterstützen würde, weshalb dies dazu genutzt werden könnte, um Segmentationsprozesse im Rahmen der visuellen Szenenanalyse zu ermöglichen, z.B. die Abgrenzung einer zu identifizierenden Figur von den sie umgebenden, nicht zu ihr gehörenden Konturen, dem Hintergrund (sog. „Figur-Grund-Trennung“ (engl. "figure-ground separation"))⁶²⁷, oder die Unterscheidung von Objekten⁶²⁸ als die Basisoperationen jedes Mustererkennungsprozesses.

3.424 In einer Vielzahl von Arbeiten⁶²⁹ ist inzwischen in Experimenten, vor allem

(7) Symmetrie (engl. "symmetry") und

(8) Prägnanz (engl. "good form").

Einführend s. z.B. D. PURVES et al. (Eds.): Principles of Cognitive Neuroscience. Sinauer Associates. Sunderland/MASS. 2008. PP. 36-37 – E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): Principles of Neural Science. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. PP. 556-57, 558.

S. auch M.R. BENNETT / P.M.S. HACKER: History of Cognitive Neuroscience. Wiley-Blackwell. Malden/MA. 2008. PP. 10-11.

S. auch Fn. 624.

626 Grundlegend s. D.O. HEBB: The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. Wiley-Interscience. New York. 1949.

Einen eingehenden Überblick bietet z.B. Chr. HUYCK / P. PASSMORE: A Review of Cell Assemblies. Manuscript. 2011.

S. auch die Ausführungen in Fn. 610.

627 S. eingehend z.B. D.L. WANG: Visual Scene Segmentation. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 2002. PP. 1215-19.

S. allgemeinverständlich einführend z.B. W. SINGER: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 129-30 – W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 87-89 – A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 182-83.

628 S. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 126.

629 Einen eingehenden Überblick hierzu bietet z.B. W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1139-43 – W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 83 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 58-64 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / A.K. KREITER / T.B. SCHILLEN / W. SINGER: Temporal Coding in the Visual Cortex: New Vistas on Integration in the Nervous System. Trends in Neuroscience. Vol. 15. 1992. PP. 218-26 – P. KÖNIG / A.K. ENGEL / W. SINGER: The Relation Between Oscillatory Activity and Long-Range Synchronization in Cat Visual Cortex. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 92. 1995. PP. 290-94 – W. SINGER / C. M. GRAY: Visual Feature Integration and the Temporal Cor-

an Katzen und Affen, anhand der sog. „Kreuz-Korrelationsanalyse“ (engl. „cross-correlation analysis“)⁶³⁰ nachgewiesen worden, daß die Neuronen des visuellen Systems in kortikalen und subkortikalen Zentren ihre Aktionspotentiale präzise im Bereich von zehn bis zwanzig Millisekunden synchronisieren können⁶³¹, derart, daß dadurch ein dynamischer Gruppierungsmechanismus instantiiert wird, der die Voraussetzung dafür schafft, daß anhand einer flexiblen Rekombination von Neuronenimpulsen ganz verschiedene Konstellationen von Neuronen nacheinander analysiert und repräsentiert werden können, wobei jedoch die einzelnen Neuronen relativ unselektiv auf ein breites Spektrum von verschiedenen Objektmerkmalen reagieren, sodaß ein einzelnes Neuron zu verschiedenen Zeitpunkten ein Element von mehreren Populationen sein

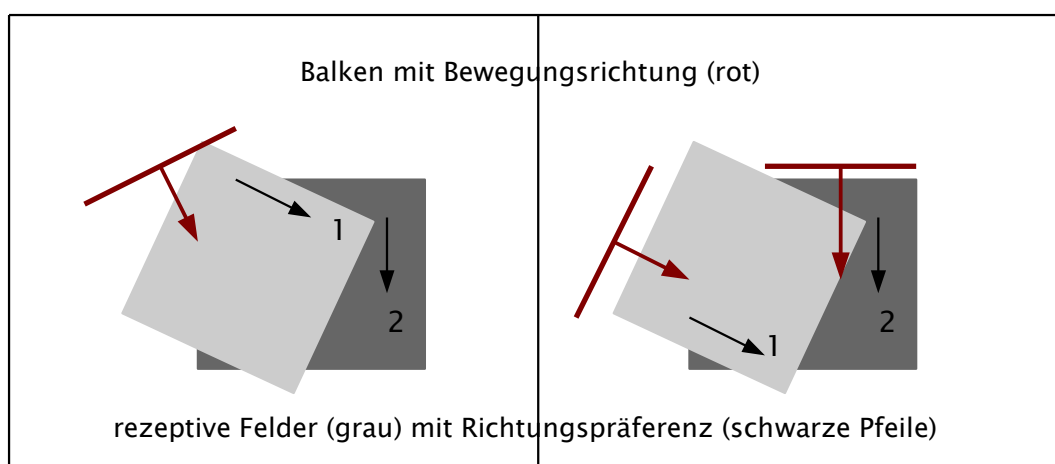
relation Hypothesis. Annual Review of Neuroscience. Vol. 18. 1995. PP. 555-86 – A.K. ENGEL: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996. S. 16-118 – W. SINGER: Synchronization of Cortical Activity and its Putative Role in Information Processing and Learning. Annual Review of Physiology. Vol. 55. 1993. PP. 349-74 – W. SINGER: Development and Plasticity of Cortical Processing Architectures. Science. Vol. 270. 1995. PP. 758-64 – A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 619 m.w.Lit. – A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 11-24.

Einen einführenden Überblick bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Ed. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 58-61 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 129-34 – A.K. ENGEL: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 203-205 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: C.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 224-32 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 167-68 – A.K. ENGEL / M. BRECHT / P. FRIES / W. SINGER: Zeitliche Bindung und der Aufbau visueller Objektrepräsentationen. In: U. KOTKAMP / W. KRAUSE (Hrsg.): Intelligente Informationsverarbeitung. Deutscher Universitätsverlag. Wiesbaden. 1998. S. 193-200 – W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 160-70 – W. SINGER: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 134-38 – W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 105-108 – W. SINGER: Bewußtsein, etwas „Neues, bis dahin Unerhörtes“. Berichte und Abhandlungen. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Bd. 4. Berlin. 1997. S. 175-90 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: C.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): Bewusstsein – Philosophie, Neuro-wissenschaften, Ethik. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 224-32.

⁶³⁰ Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.424.04.

⁶³¹ Einführend s. z.B. W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 82 – W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1137.

kann und damit an der Repräsentation von sehr vielen verschiedenen Objektmerkmalen partizipieren kann, weshalb sich die neuronalen Populationen in hohem Grad überlappen können.⁶³² Demnach kann man eine Beschreibung eines bestimmten Merkmals nur erhalten, wenn die Gesamtheit der Antwort-eigenschaften einer funktionell kohärenten Population von Neuronen gemeinsam bewertet wird, die auf dieses Merkmal ansprechen.⁶³³ Daher kann man mit einer begrenzten Anzahl von Neuronen, d.h. mit konstanten Neuronenres-sourcen, nahezu eine unbegrenzte Anzahl von (dynamischen) Populationen erzeugen, die sich voneinander nur anhand der jeweiligen Konfiguration und dem Aktivierungsgrad der kohärent aktiven Neuronen unterscheiden, sodaß derart nahezu eine unbegrenzte Anzahl von Objektmerkmalen repräsentiert werden können.⁶³⁴ Ferner löst man mit der Synchronisationsstrategie das sog.



Graphik.19: Schematische Darstellung des Balkenexperiments: Die neuronalen Signale von zwei Neuronengruppen mit verschiedenen Richtungspräferenzen, angedeutet anhand der Pfeile (schwarz) in ihrem jeweiligen rezeptiven Feld (graue Quadrate) 1 und 2, werden mit Hilfe von mehreren Mikroelektroden abgeleitet: (1) Während ein zusammenhängender Lichtbalken mit gleichbleibender Geschwindigkeit (linkes Graphiksegment) in eine bestimmte Richtung (roter Pfeil) bewegt wird, der durch die sog. „rezeptiven Felder“ (engl. „receptive fields“) 1 und 2 der bewegungsempfindlichen Neuronen der zwei Neuronenpopulationen mit je ähnlicher Richtungspräferenz gleitet, führt dazu, daß die neuronalen Impulse der beiden Neuronengruppen synchron aktiv sind, da die Neuronen von demselben Objekt aktiviert werden und dessen Bewegungsrichtung etwa in der Mitte der jeweiligen Richtungspräferenzen der Neuronen liegt. (2) Sofern aber die Neuronen mit zwei gegenläufigen Balken aktiviert werden (rechtes Graphiksegment), nimmt die Synchronisation der neuronalen Signale ab, da jeder der beiden Lichtbalken jeweils nur diejenige Neuronengruppe aktiviert, deren bevorzugte Richtungspräferenz mit der Bewegungsrichtung des betreffenden Lichtbalkens übereinstimmt, angedeutet durch die parallelen Pfeile (rot und schwarz) (angelehnt an A.K. KREITER / W. SINGER: Stimulus-Dependent Synchronization of Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. The Journal of Neuroscience. Vol. 16. No. 7. 1996. PP. 2384 und W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. Neuron. Vol. 24. 1999. P. 59).

632 S. z.B. W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 155-60.

633 S. Fn. 608, 609, 620.

634 S. Fn. 608, 609, 620.

„Superpositionsproblem“ (engl. “superposition problem”)⁶³⁵, indem die Signatur des synchronen neuronalen Signals für die nachfolgenden Informationsverarbeitungsstrukturen effektiver als zusammengehörig identifizierbar wird. Im Folgenden werden nun verschiedene Typen von Experimenten zur Assembly- bzw. Synchronisationshypothese vorgestellt:

3.424.01 In einer Vielzahl von (Tier-)Experimenten, vor allem an Katzen⁶³⁶, aber auch an Mäusen⁶³⁷, Affen⁶³⁸, Tauben⁶³⁹ und Schildkröten⁶⁴⁰, hat man nun inzwischen in der Tat nachgewiesen, daß die Neuronen im visuellen Kortex ihre Aktionspotentiale mit einer Präzision von wenigen Millisekunden synchronisieren und dadurch zu Assemblies zusammengefaßt werden können, u.z. nicht nur innerhalb einzelner kortikaler Kolumnen und Areale, z.B. des primären visuellen Areals V1⁶⁴¹, sondern auch zwischen den verschiedenen visuellen Arealen in-

635 S. z.B. W. SINGER: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 82 – Chr. von der MALSBERG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 96 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 55 – Chr. von der MALSBERG: The Correlation Theory of Brain Function E. DOMANY / J.L. van HEMMEN / K. SCHULTEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Temporal Aspects of Coding and Information Processing in Biological Systems. Ch. 2. Springer-Verlag. New York u.a. 1994. PP. 95-119 – W. SINGER / A.K. ENGEL / A.K. KREITER / M.H.J. MUNK / S. NEUENSCHWANDER / P.R. ROELFSEMA: Neuronal Assemblies: Necessity, Signature and Detectability. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 1. P. 252 – Chr. von der MALSBERG / W. SCHNEIDER: A Neural Cocktail-Party Processor. *Biological Cybernetics*. Vol. 54. 1986. PP. 29-40.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 6.31.

636 S. z.B. R. ECKHORN / R. BAUER / W. JORDAN / M. BROSCHE / M. KRUSE / M. MUNK / H.J. REITBOECK: Coherent Oscillations: A Mechanism for Feature Linking in the Visual Cortex? *Biological Cybernetics*. Vol. 60. 1988. PP. 121-30 – C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in Orientation Columns of Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 86. 1989. PP. 1698-1702 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 2. 1990. PP. 588-606 – M. BROSCHE / R. BAUER / R. ECKHORN: Synchronous High-Frequency Oscillations in Cat Area 18. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 7. 1995. PP. 86-95. Einen Überblick bietet z.B. W. SINGER: Response Synchronization, Gamma Oscillations, and Perceptual Binding in Cat Primary Visual Cortex. In: A. PETERS / B.R. PAYNE (Eds.): *The Cat Primary Visual Cortex*. Academic Press. San Diego. 2002. PP. 521-59.

637 S. z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 71.

638 Der Nachweis erfolgte in diesen Fällen im (extra-)striären Kortex: S. z.B. D.Y. TS'O / C.D. GILBERT: The Organization of Chromatic and Spatial Interactions in the Primate Striate Cortex. *Journal of Neuroscience*. Vol. 8. 1988. PP. 1712-27 – A.K. KREITER / W. SINGER: Oscillatory Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 4. 1992. PP. 369-75.

639 S. z.B. S. NEUENSCHWANDER / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER / F.J. VARELA: Synchronization of Neuronal Responses in the Optic Tectum of Awake Pigeons. *Visual Neuroscience*. Vol. 13. 1996. PP. 575-84.

640 S. z.B. J.C. PRECHTL: Visual Motion Induces Synchronous Oscillations in Turtle Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 91. 1994. PP. 12467-71.

641 S. z.B. A. FRIEN / R. ECKHORN / R. BAUER / T. WOELBERN / H. KEHR: Stimulus-Specific Fast Oscillations at Zero Phase Between Visual Areas V1 and V2 of Awake Monkey. *Neuroreport*. Vol. 5. 1994. PP. 2273-77 – P.A. SALIN / J. BULLIER: Corticocortical Connections in the Visual System: Structure

nerhalb einer Hemisphäre, z.B. zwischen den Arealen 17, 18 und 19 bei Katzen⁶⁴², dem Areal 17 und dem Areal PMLS⁶⁴³ oder z.B. zwischen dem primären und sekundären visuellen Areal V1 und V2⁶⁴⁴, und sogar zwischen den primären visuellen Arealen in den beiden zerebralen Hemisphären⁶⁴⁵, wobei die betreffenden Synchronisationsprozesse überwiegend bevorzugt in einem bestimmten Frequenzband, dem sog. „Gamma(γ)-Band“ (engl. „gamma(γ)-band“)⁶⁴⁶ beobachtet werden, d.h. im Frequenzbereich zwischen etwa 30-70 Hz.⁶⁴⁷ Ein typisches Experiment besteht z.B. darin, daß neuronale Signale von mehreren sensorischen Neuronen in derselben Kolumne in den Arealen 17 und 18 des visuellen Kortex einer Katze mit Hilfe von mehreren Mikroelektroden abgeleitet werden, während ein Lichtreiz mit gleichbleibender Geschwindigkeit

and Function. *Physiological Reviews*. Vol. 75. 1995. PP. 107-54, v.a. PP. 135-42.

642 S. z.B. R. ECKHORN / R. BAUER / W. JORDAN / M. BROSCHE / M. KRUSE / M. MUNK / H.J. REITBOECK: Coherent Oscillations: A Mechanism for Feature Linking in the Visual Cortex? Multiple Electrode and Correlations Analyses in the Cat. *Biological Cybernetics*. Vol. 60. 1988. PP. 121-30 – R. ECKHORN / T. SCHANZE / M. BROSCHE / W. SALEM / R. BAUER: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BAŞAR / T. BULLOCK (Eds.): *Induced Rhythms in the Brain*. Springer-Verlag, New York. 1992. PP. 47-80 – A.K. ENGEL / A.K. KREITER / P. KÖNIG / W. SINGER: Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses between Striate and Extrastriate Visual Cortical Areas of the Cat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 88. 1991. PP. 6048-52 – J.I. NELSON / P.A. SALIN / M.H.-J. MUNK / M. ARZI / J. BULLIER: Spatial and Temporal Coherence in Cortico-Cortical Connections: A Cross-Correlation Study in Areas 17 and 18 in the Cat. *Visual Neuroscience*. Vol. 9. 1992. PP. 21-37.

643 S. z.B. A.K. ENGEL / A.K. KREITER / P. KÖNIG / W. SINGER: Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses between Striate and Extrastriate Visual Cortical Areas of the Cat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 88. 1991. PP. 6049-50.
Die Abkürzung „PMLS“ steht dabei für das corticale Areal „posteromedial lateral suprasylvian area“.

644 S. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2012. S. 71, 69.

645 S. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / A.K. KREITER / W. SINGER: Interhemispheric Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses in Cat Visual Cortex. *Science*. Vol. 252. 1991. PP. 1177-79 – R. ECKHORN / T. SCHANZE / M. BROSCHE / W. SALEM / R. BAUER: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BASAR (Ed.): *Induced Rhythms in the Brain*. Springer-Verlag, New York. 1992. PP. 47-80.

646 S. z.B. P. FRIES / D. NIKOLIĆ / W. SINGER: The Gamma Cycle. *Trends in Neurosciences*. Vol. 30. 2007. PP. 309-16.

Man spricht auch von sog. „Gamma(γ)-Oszillationen“ (engl. „gamma-oscillations“) oder von sog. „40-Hz-Oszillationen“.

S. hierzu z.B. A.K. ENGEL: Gamma Oscillations. In: P. WILKEN / A. CLEEREMANS / T. BAYNE (Eds.): *Oxford Companion to Consciousness*. Oxford Univ. Press, Oxford. 2009. PP. 321-27.

Einen allgemeineren Überblick über sog. „neuronale Oszillationen“ (engl. „neural oscillations“) findet man in X.-J. WANG: Neural Oscillations. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Nature Publishing Group, London u.a. 2003. PP. 272-80, v.a. PP. 274-76, 279.

S. hierzu auch G. BUZSÁKI: *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press, Oxford, New York. 2006. PP. 231-61, v.a. PP. 240-43, 243-46, 246-48, 248-52 – Chr. HERRMANN: Bedeutung von 40-Hz-Oszillationen für kognitive Prozesse. Habilitation. Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie. Universität Leipzig. Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften. Sächsisches Digitalzentrum. Dresden. Leipzig. 2002. S. 17-27.

647 Die Bandbreite des Gamma-Bands wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert, sodaß man auch andere Angaben findet, z.B. im Bereich von 30-100 Hz.

in eine bestimmte Richtung bewegt wird, z.B. ein Lichtbalken, der durch die sog. „rezeptiven Felder“ (engl. “receptive fields”)⁶⁴⁸ von bewegungsempfindlichen Neuronen mit ähnlicher Richtungspräferenz gleitet (s. Graphik.19).⁶⁴⁹

Die große Mehrzahl der Untersuchungen ist dabei zwar an anästhesierten Versuchstieren durchgeführt worden, jedoch sind sehr ähnliche Synchronisationsphänomene auch z.B. bei wachen Affen und Katzen nachgewiesen worden.⁶⁵⁰

Ferner gibt es experimentelle Belege dafür, daß diese neuronale Synchronisation auch zwischen kortikalen und subkortikalen visuellen Strukturen zu finden ist, wie z.B. zwischen der Retina, dem Thalamus und dem primärvisuellen Kortex⁶⁵¹, und zwischen dem Colliculus superior und den kortikalen Arealen 18

648 Unter dem Begriff des sog. „(klassischen) rezeptiven Feldes“ (engl. “(classical) Receptive Field (cRF)”) eines (visuellen) Neurons, z.B. einer Ganglionzelle (engl. “ganglion cell”), versteht man in der kognitiven Neurowissenschaft bzw. der Neurophysiologie den Bereich eines sensorischen Organs, z.B. der Retina, in dem durch (visuelle) Stimulation mit einem kleinen Reiz, dem sog. „Stimulus“ (engl. “stimulus”), z.B. mit Licht, eine Veränderung der Aktivierung eines (sensorischen) Neurons verursacht werden kann.

Grundlegend s. z.B. D.H. HUBEL / T.N. WIESEL: Receptive Fields of Single Neurones in the Cat's Striate Cortex. *Journal of Physiology*. Vol. 148. 1959. P. 576-86 unter Hinweis auf H.K. HARTLINE: Inhibition of Activity of Visual Receptors by Illuminating Nearby Retinal Areas in the Limulus Eye. *Federation Proceedings*. Vol. 8. 1949. P. 69.

Eingehend s. hierzu z.B. S.E. PALMER: *Vision Science: Photons to Phenomenology*. MIT Press. Cambridge. 1999. PP. 146-58, 171-93.

Einführend s. z.B. E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): *Principles of Neural Science*. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. PP. 464-66, 502-504, 510-16, 564-70, 585-92 – D. PURVES et al. (Eds.): *Principles of Cognitive Neuroscience*. Sinauer Associates. Sunderland/MASS. 2008. PP. 107-109 – M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009. S. 327-31, 331-35, 348-49, 357-63, 739-41 – Fr. RÖSLER: *Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011. S. 57-62 – J.P.J. PINEL / P. PAULI: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007. S. 184-88.

S. auch P. SMITH CHURCHLAND: *Brain-Wise: Studies in Neurophilosophy*. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. PP. 287-88 – W. GERSTNER / W.M. KISTLER: *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002. PP. 398-99.

649 S. z.B. C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in Orientation Columns of Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 86. 1989. PP. 1699-1701.

Zur interkolumnaren Synchronisation s. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 2. 1990. PP. 591-96 – C.M. GRAY / P. KÖNIG / A.K. ENGEL / W. SINGER: Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex Exhibit Inter-Columnar Synchronization which Reflects Global Stimulus Properties. *Nature*. Vol. 338. 1989. PP. 334-37.

650 S. z.B. A.K. KREITER / W. SINGER: Oscillatory Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 4. 1992. PP. 369-75 – P.R. ROELFSEMA / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Interareal Synchronization Between the Visual, Parietal and Motor Cortex of the Awake Cat. *European Journal of Neuroscience*. Supplement 8. 1995. P. 112 – A.K. KREITER / W. SINGER: Stimulus-Dependent Synchronization of Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 16. No. 7. 1996. PP. 2381-96, v.a. PP. 2391-93.

651 S. z.B. S. NEUENSCHWANDER / W. SINGER: Long-Range Synchronization of Oscillatory Light Responses in the Cat Retina and Lateral Geniculate Nucleus. *Nature*. Vol. 379. 1996. PP. 728-33 – M.

und PMLS.⁶⁵² Desweiteren zeigten die Ergebnisse von EEG-Untersuchungen, daß auch beim Menschen ähnlich präzise Synchronisationsphänomene in visuellen Kortexarealen auftreten.⁶⁵³

3.424.02 Es konnte weiterhin anhand einer Vielzahl von experimentellen Belegen⁶⁵⁴ gezeigt werden, daß diese zeitlichen Synchronisationsprozesse im visuellen Kortex tatsächlich von der Konfiguration der dargebotenen Reize moduliert werden, d.h., daß die neuronalen Impulse nur dann synchron aktiv sind, wenn die Neuronen von demselben Objekt aktiviert werden, z.B. indem ein zu-

CASTELO-BRANCO / S. NEUENSCHWANDER / W. SINGER: Synchronization of Visual Responses Between the Cortex, Lateral Geniculate Nucleus, and Retina in the Anesthetized Cat. *Journal of Neuroscience*. Vol. 18. 1998. PP. 6395-6410.

652 S. z.B. M. BRECHT / A.K. ENGEL: Cortico-Tectal Interactions in the Cat Visual System. In: Chr. von der MALSBERG / W. von SEELEN: *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 96)*. Bochum, Germany, July 16-19. 1996. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 1112/1996. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1996. PP. 395-99, v.a. PP. 396, 397 – M. BRECHT / W. SINGER / A.K. ENGEL: Correlation Analysis of Corticotectal Interactions in the Cat Visual System. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 80. 1998. PP. 2394-2407. S. Fn. 643.

653 S. z.B. C. TALLON / O. BERTRAND / P. BOUCHET / J. PERNIER: Gamma-Range Activity Evoked by Coherent Visual Stimuli in Humans. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 7. 1995. PP. 1285-91, v.a. PP. 1290-91 – Chr.S. HERRMANN / M.H.J. MUNK / A.K. ENGEL: Cognitive Functions of Gamma-Band Activity: Memory Match and Utilization. *Trends in Cognitive Science*. Vol. 8. 2004. PP. 347-55, v.a. PP. 349, 351-52, 353.

Einen eingehenden Überblick hierzu bietet z.B. W.A. FREIWALD / A.K. KREITER / W. SINGER: Synchronization and Assembly Formation in the Visual Cortex. In: M.A.L. NICOLELIS (Ed.): *Advances in Neural Population Coding*. Elsevier. Amsterdam. 2001. PP. 111-40, v.a. PP. 124-31.

654 In Bezug auf interkolumnare Korrelationen bei der Katze s. z.B. C.M. GRAY / P. KÖNIG / A.K. ENGEL / W. SINGER: Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex Exhibit Inter-Columnar Synchronization which Reflects Global Stimulus Properties. *Nature*. Vol. 338. 1989. PP. 334-37, v.a. P. 335. In Bezug auf intraareale Korrelationen des primären visuellen Areals 17 bei der Katze s. z.B. C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in Orientation Columns of Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 86. 1989. PP. 1699-1701 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Direct Physiological Evidence for Scene Segmentation by Temporal Coding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 88. 1991. PP. 9136-40 – W.A. FREIWALD / A.K. KREITER / W. SINGER: Stimulus Dependent Intercolumnar Synchronization of Single Unit Responses in Cat Area 17. *Neuroreport*. Vol. 6. 1995. PP. 2348-52.

In Bezug auf interareale Korrelationen s. z.B. A.K. ENGEL / A.K. KREITER / P. KÖNIG / W. SINGER: Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses between Striate and Extrastriate Visual Cortical Areas of the Cat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 88. 1991. PP. 6048-52 – R. ECKHORN / R. BAUER / W. JORDAN / M. BROSCHE / M. KRUSE / M. MUNK / H.J. REITBOECK: Coherent Oscillations: A Mechanism for Feature Linking in the Visual Cortex? Multiple Electrode and Correlations Analyses in the Cat. *Biological Cybernetics*. Vol. 60. 1988. PP. 121-30.

In Bezug auf Korrelationen bei Versuchstieren im Wachzustand s. z.B. A.K. KREITER / W. SINGER: Stimulus-Dependent Synchronization of Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 16. 1996. PP. 2381-96, v.a. PP. 2391-94 – Chr. KAYSER / R.F. SALAZAR / P. KÖNIG: Responses to Natural Scenes in Cat V1. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 90. 2003. PP. 1910-20.

Einen eingehenden Überblick hierzu bietet z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / A.K. KREITER / T.B. SCHILLEN / W. SINGER: Temporal Coding in the Visual Cortex: New Vistas on Integration in the Nervous System. *Trends in Neuroscience*. Vol. 15. 1992. PP. 218-26.

sammenhängender Lichtbalken über deren jeweilige rezeptive Felder⁶⁵⁵ bewegt wird. Sofern aber die Neuronen mit zwei gegenläufigen Balken aktiviert werden, nimmt die zeitliche Kopplung ab, oder sie verschwindet sogar ganz, ein Beleg dafür, daß die temporale Korrelation von der Konfiguration bestimmter Reizparameter, wie z.B. der Kontinuität oder der Kohärenz der Bewegung, abhängt (s. Graphik.19).

3.424.03 Die bisher erwähnten Experimente belegen allerdings nur, daß die Voraussetzungen dafür gegeben sind, daß es im visuellen Wahrnehmungssystem über diese Synchronisationsprozesse zu einer zeitlichen Bindung kommen kann, jedoch liefern sie „noch keinen Beweis dafür, daß den neuronalen Korrelationen [eine] kausale Relevanz zukommt“, d.h., daß ein neuronaler Synchronisationsprozeß „mit im Verhalten meßbaren Wahrnehmungsleistungen korreliert“, m.a.W., die temporalen Korrelationen zwischen den neuronalen Impulsen „eine notwendige Bedingung für die Entstehung [von] kohärenten Wahrnehmungseindrücken sind“, z.B. für den Aufbau von normalen Objektpräsentationen.⁶⁵⁶ In einer Reihe von Experimenten an Katzen mit einer Fehlstellung der Augen, z.B. an Katzen mit konvergentem Schielen⁶⁵⁷, einer sog. „Schielamblyopie“ (engl. “strabismic amblyopia”), konnte man inzwischen einige Indizien für die geforderte funktionelle Relevanz der beobachteten Synchronisationsphänomene sammeln: Während die Neuronen, die vorzugsweise vom intakten Auge aktiviert werden, eine normale Synchronisationsleistung zeigen, wird bei den Neuronen, die vorzugsweise vom amblyopen Auge innerviert werden, eine deutlich verringerte Synchronisationsleistung vorgefunden, woraus sich schließen läßt, daß diese selektive Störung der intrakortikalen Synchronisation funktionell relevant für die bei Katzen mit konvergentem Schielen auftretenden Wahrnehmungsbeeinträchtigungen sind.

Diese Korrelation zwischen einem funktionellen Defizit und der gestörten neuronalen Synchronisation ist ebenfalls nachgewiesen worden in einer neurophysiologischen (Korrelations-)Studie⁶⁵⁸, die begleitend zu einer neuroanatomischen Studie⁶⁵⁹ bei Katzen mit divergentem Schielen durchgeführt worden war: Die neuronale Synchronisation ist vor allem zwischen den kortikalen Neuronen gestört, die ihre Informationen von sensorischen Neuronen aus beiden Augen erhalten, während eine normale Synchronisationsleistung (nur) bei den kortikalen Neuronen auftritt, die von demselben (gesunden) Auge dominiert werden.

655 S. Fn. 648.

656 Einen einführenden Überblick bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Ed. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 60 – A.K. ENGEL / P. KÖNIG: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 134, 135-37.

657 S. z.B. P.R. ROELFSEMA / P. KÖNIG / A.K. ENGEL / R. SIRETEANU / W. SINGER: Reduced Synchronization in the Visual Cortex of Cats with Strabismic Amblyopia. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 6. 1994. PP. 1645-55.

658 S. P. KÖNIG / A.K. ENGEL / S. LÖWEL / W. SINGER: Squint Affects Synchronization of Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 5. 1993. PP. 501-508.

659 S. LÖWEL / W. SINGER: Selection of Intrinsic Horizontal Connections in the Visual Cortex by Correlated Neuronal Activity. *Science*. Vol. 255. 1992. PP. 209-12.

Eine weitere hochsignifikante Korrelation zwischen einer kortikalen Synchronisation und einer perzeptiven Funktion ergibt sich aus den Experimenten⁶⁶⁰ zum sog. „binokularen Wettstreit“ (engl. “binocular rivalry”) an Katzen im Wachzustand, wonach die Synchronisation bei kortikalen Neuronen in den visuellen Arealen 17 und 18 abhängig davon, ob sie den dominanten oder den supprimierten Reiz repräsentieren, variiert, d.h., bei denjenigen Neuronen, die das wahrgenommene Muster repräsentieren, indem sie von demjenigen Auge aktiviert werden, das in der betreffenden Episode gerade die Wahrnehmung dominiert, nimmt der Synchronisationseffekt zu, während der Synchronisationseffekt zwischen denjenigen Neuronen abnimmt, die in der betreffenden Episode gerade das unterdrückte Muster kodieren.

Abschließend kann man feststellen, daß diese neurophysiologischen Resultate es als sehr wahrscheinlich erscheinen lassen, daß „der Aufbau einer kohärenten Objektrepräsentation und das Entstehen eines Wahrnehmungseindrucks nur dann möglich ist, wenn die hierfür relevanten neuronalen Populationen hinreichend synchronisiert sind“⁶⁶¹, ein direkter Beweis steht jedoch (noch) aus.⁶⁶²

3.424.04 Die dabei verwendete statistische Methode, die sog. „Kreuz-Korrelationsanalyse“ (engl. “cross-correlation analysis”)⁶⁶³ (s. Graphik.20) dient dabei,

660 S. z.B. P. FRIES / P.R. ROELFSEMA / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Synchronization of Oscillatory Responses in Visual Cortex Correlates with Perception in Interocular Rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 94. 1997. PP. 12699-704 – A.K. ENGEL / P. FRIES / P. KÖNIG / M. BRECHT / W. SINGER: Temporal Binding, Binocular Rivalry, and Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 128-51 – P. FRIES / J.-H. SCHRÖDER / P.R. ROELFSEMA / W. SINGER / A.K. ENGEL: Oscillatory Neuronal Synchronization in Primary Visual Cortex as a Correlate of Stimulus Selection. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 22. 2002. PP. 3739-54.

Einen einführenden Überblick bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Ed. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 61, 62 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 227-30 – W. SINGER: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1140-41.

661 S. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 73.

662 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.47.

663 S. eingehend z.B. C.D. BRODY: Correlations without Synchrony. *Neural Computation*. Vol. 11. 1999. PP. 1537-51, v.a. PP. 1538-41 – A. AERTSEN / G.L. GERSTEIN: Evaluation of Neuronal Connectivity: Sensitivity of Cross-Correlation. *Brain Research*. Vol. 340. 1985. PP. 341-54 – P. KÖNIG: A Method for the Quantification of Synchrony and Oscillatory Properties of Neuronal Activity. *Journal of Neuroscience Methods*. Vol. 54. 1994. PP. 31-37.

S. einführend z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 456-61, v.a. PP. 456-57 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40, v.a. PP. 127-29 – R. UNBEHAUEN: *Systemtheorie I: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich*. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. 2002 – A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 9-10 – N. SALARI / A. MAYE: Brain Waves: How Synchronized Neuronal Oscillations Can Explain the Per-

ganz allgemein, der Ermittlung des zeitlichen Zusammenhangs von Ereignissen an verschiedenen Orten, z.B. der Erzeugung eines Aktionspotentials (engl. "action potential")⁶⁶⁴, der Erzeugung eines, wie z.B. bei W. SINGER et al.⁶⁶⁵, sog. „lokalen Feldpotentials“ (engl. "local field potential")⁶⁶⁶ oder der Variation der Aktivität in Form der mittleren Feuerrate (engl. "mean fire rate") eines Neurons bzw. einer Neuronenpopulation, d.h. der Zeitpunkt des Eintreffens der Ereignisse ist entscheidend:

Bei diskreten Signalsequenzen, d.h. einer Sequenz von Aktionspotentialen, kann die Kreuzkorrelation anhand des Korrelationsprodukts von zwei Signalen bzw. Signalsequenzen $S_1(t)$, $S_2(t)$ beschrieben werden gemäß

$$C(\tau) = \sum_{-\infty}^{\infty} S_1(t) \cdot S_2(t+\tau), \quad (27)$$

wobei τ die relative zeitliche Verschiebung (engl. "delay") der Signale zueinander darstellt. Der Grad der Korrelation kann dann angegeben werden anhand des (Kreuz-)Korrelationskoeffizienten

$$r_{s_1, s_2} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{1i}(t) - \bar{s}_1)(S_{2i}(t+\tau) - \bar{s}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_{1i}(t) - \bar{s}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (S_{2i}(t+\tau) - \bar{s}_2)^2}} \quad (28)$$

für diskrete Zeitsignalfolgen $S_{1(1...N)}$ und $S_{2(1...N)}$ mit den Mittelwerten

$$\bar{s}_1 = \frac{1}{N} \sum_i s_{1i} \quad \text{und} \quad \bar{s}_2 = \frac{1}{N} \sum_i s_{2i} \quad \text{und den diskreten Zeitpunkten } i = 1 \dots N.$$

Betrachtet man dagegen die mittleren Feuerraten $F_1(t)$, $F_2(t)$ von zwei Neuronen(-populationen), dann beschreibt die Kreuzkorrelationsfunktion $K(\Delta t)$ die (Kreuz-)Korrelation zwischen diesen beiden (Zeit-)Funktionen, abhängig von der relativen zeitlichen Verschiebung Δt gemäß

$$K(\Delta t) = \text{corr}(F_1(t), F_2(t+\Delta t)) = \frac{\int (F_1(t) - \langle f_1 \rangle)(F_2(t+\Delta t) - \langle f_2 \rangle) dt}{\sqrt{\int (F_1(t) - \langle f_1 \rangle)^2 dt \cdot \int (F_2(t+\Delta t) - \langle f_2 \rangle)^2 dt}} \quad (29)$$

ception of Illusory Objects. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2008, PP. 25-27 – U. FICKEL: Zeitliche Muster neuronaler Aktivität. Stimulusgekoppelte und intrinsisch generierte Komponenten. Dissertation. Universität Hamburg, 2007, S. 33-34.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet R. GOEBEL: Synchroner Oszillationen in visuellen Systemen und in neuronalen Netzwerk-Modellen. In: I. DUWE / F. KURFESS / G. PAASS / G. PALM / H. RITTER / S. VOGEL (Hrsg.): Konnektionismus und Neuronale Netze. Beiträge zur Herbstschule (HeKoNN'94). Münster/Westfalen, 10.-14. Oktober 1994. GMD-Studien, Nr. 242, 1994, S. 312-13.

⁶⁶⁴ Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.11, v.a. Fn. 469.

⁶⁶⁵ Eine eingehende Beschreibung der (Aufzeichnungs-)Methoden und der Datenverarbeitungsanalyse bietet z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience, Vol. 2, 1990, PP. 589-602, v.a. P. 589, die unter einer Verwendung von Multielektroden ein sog. „lokales Feldpotential“ (engl. "Local Field Potential (LFP)") aufzeichnen.

⁶⁶⁶ Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.11, v.a. Fn. 471.

mit den Erwartungswerten $\langle f_1 \rangle$ und $\langle f_2 \rangle$, basierend auf der allgemeinen Kreuzkorrelationsfunktion von zwei kontinuierlichen Funktionen $F_1(t)$, $F_2(t)$:

$$K(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_1(t) \cdot F_2(t + \Delta t) dt \quad (30)$$

Eine (Phasen-)Synchronisation der Signalsequenzen liegt vor, wenn der (Kreuz-)Korrelationskoeffizient, der die Werte $0 < r_{s_1, s_2} \leq 1$ annimmt, möglichst nahe bei '1' liegt, und, falls es sich um Oszillationsfunktionen handelt, die zeitliche Verzögerung, in diesem Fall als sog. „Phasenverschiebung“ (engl. „phase lag“) oder als sog. „Phasendifferenz“ (engl. „phase difference“)⁶⁶⁷ bezeichnet, nahe bei '0' liegt.

Die Daten werden dann in ein Kreuzkorrelationshistogramm, z.B. in ein sog. „(Joint) Peri-Stimulus Time Histogram ((J)PSTH)“⁶⁶⁸ bzw. in ein sog. „Field Poten-

667 Unter dem Begriff der sog. „Phasendifferenz“ (engl. „phase difference“) versteht man, ausgehend von neuronalen Signalen $x(t)$ in Form von Oszillationsfunktionen bzw. dominanten Moden gemäß der allgemeinen Formel

$$\tilde{x}(f, t) = at \exp(i(ft + \phi_x(t))), \quad (31)$$

als Differenz der beiden Phasenterme gemäß

$$\phi_{xy}(t) = |n\phi_x(t) - m\phi_y(t)| \quad (32)$$

S. einführend z.B. Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 2001. P. 230.

668 Eine eingehende Beschreibung der (Aufzeichnungs-)Methoden und der Datenverarbeitungsanalyse bietet z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 2. 1990. PP. 589-91, v.a. PP. 589-90 – G. NASE / W. SINGER / H. MONYER / A.K. ENGEL: Features of Neuronal Synchrony in Mouse Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 90. 2003. PP. 1115-23.

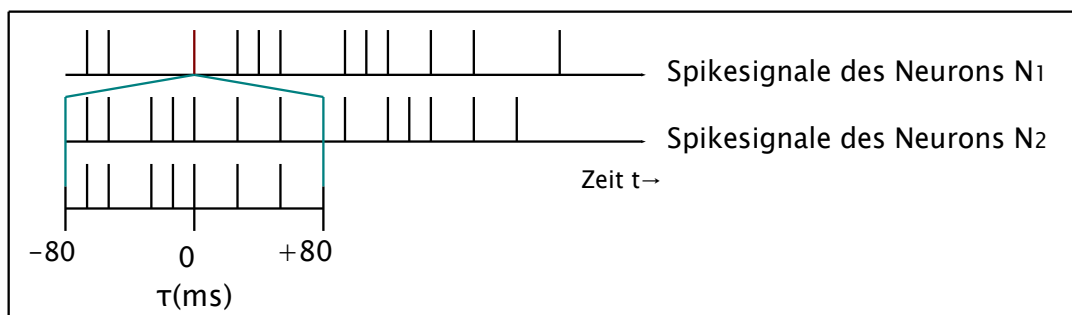
Eine allgemeine eingehende Analyse bietet z.B. A. AERTSEN / G.L. GERSTEIN / M.K. HARBIB / G. PALM: Dynamics of Neural Firing Correlation: Modulation of 'Effective Connectivity'. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 61. 1989. PP. 900-17, v.a. PP. 901-908 – A. AERTSEN / E. VAADIA / M. ABELES / E. AHISSAR / H. BERGMAN / B. KARMON / Y. LAVNER / E. MARGALIT / I. NELKEN / St. ROTTER: Neural Interactions in the Frontal Cortex of a Behaving Monkey: Signs of Dependence on Stimulus Context and Behavioral State. *Journal für Hirnforschung*. Vol. 32. 1991. PP. 735-43, v.a. PP. 738-39 – G.L. GERSTEIN / P. BEDENBAUGH / A. AERTSEN: Neuronal Assemblies. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Vol. 36. 1989. PP. 4-14 – A. AERTSEN / V. BRAITENBERG (Eds.): *Information Processing in the Cortex. Experiments and Theory*. Springer. Berlin, Heidelberg. 1992.

Einführend s. z.B. E.N. BROWN / R.E. KASS / P.P. MITRA: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 456-61, v.a. P. 457 mit mehreren Abbildungen – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. PP. 121-40, v.a. PP. 129-31 – A. ZIEMKE / S. CARDOSO DE OLIVEIRA: Neuronale Repräsentationen. Zum Repräsentationalistischen Forschungsprogramm in der Kognitionsforschung. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Repräsentationismus – was sonst?* Braunschweig. 1996. S. 23-25.

Eine verbesserte Variante zur Feststellung der effektiven Konnektivität zwischen jeweils zwei Neuronen stellt das sog. „normalized Joint Peri-Stimulus Time Histogram (JPSTH)“ dar, indem man zwischen „rate coherence“ und „event coherence“ unterscheidet.

S. hierzu z.B. H. NEVEN / A. AERTSEN: Rate Coherence and Event Coherence in the Visual Cortex: A Neuronal Model of Object Recognition. *Biological Cybernetics*. Vol. 67. 1992. PP. 309-22, v.a. P.

tial Histogram (FPH)⁶⁶⁹ übertragen (s. Graphik.21).



Graphik.20: Schematisches Diagramm einer Kreuzkorrelationsanalyse: Das Kreuzkorrelogramm von zwei Spikesfolgen (engl. "spike trains") $S_1(t)$, $S_2(t)$ berechnet die Wahrscheinlichkeit, daß ein Signal⁶⁷⁰ des Neurons N2 in einem Zeitintervall τ auftritt, bezogen auf einen bestimmten Zeitpunkt t_i des Auftretens eines Signals (hier: rot) des (Referenz-)Neurons N1, d.h., für jedes Spike, der zum Zeitpunkt t_i im Signal $S_1(t)$ auftritt, wird ein Korrelationsfenster (engl. "correlation window") (hier: blau) festgelegt, das eine bestimmte Anzahl von Zeitsegmenten, sog. "bins", enthält, und diejenigen Spikes des Signals $S_2(t)$, die innerhalb des Zeitintervalls $\tau = t_i \pm 80$ ms auftreten, gezählt (sog. "bin count"). Nachdem das Verfahren für alle n Spikes des Signals $S_1(t)$ durchgeführt worden ist, werden die Ergebnisse aufsummiert und in ein Kreuzkorrelationshistogramm eingetragen (s. Graphik.21) (in Anlehnung an A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1990. P. 597).⁶⁷¹

313: "Physiological evidence leads us to distinguish between two types of coherence, based on the time constants involved: *rate coherence*, i.e. correlation of firing rates, resulting in a broad peak (in the order of 100 ms or more) in crosscorrelograms of the activities of simultaneously recorded neurons, and *event coherency*, i.e. Correlated individual spikes, reflected in narrow (several ms) correlation peaks (...). Furthermore, we assume that only strong connections are able to transmit firing rates, while the effect of weak connections is to synchronize the events in a population of neurons (...). Rate coherence recruits new neurons into an already active group, event coherence organizes the active group into internally coherent, mutually incoherent subgroups. Or, in the language of set theory: rate coherence performs the operation of union, event coherence that of intersection."

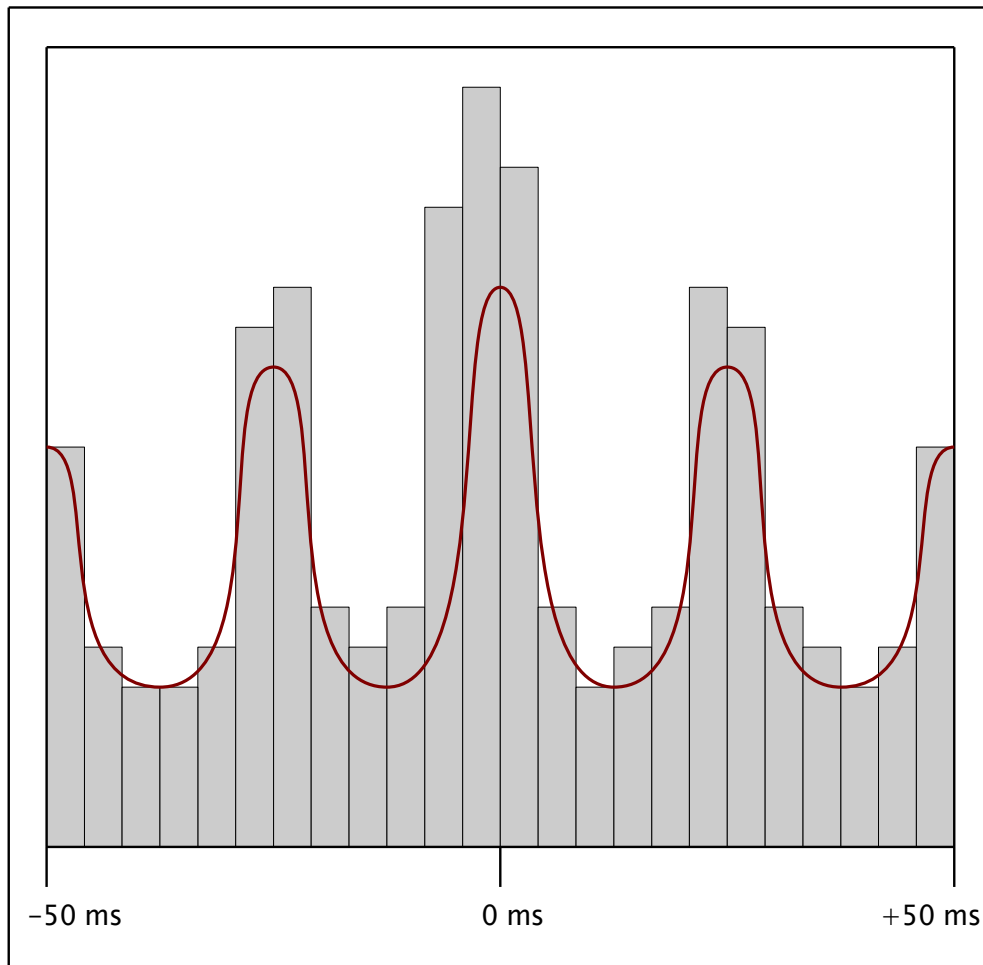
669 Eine eingehende Beschreibung der (Aufzeichnungs-)Methoden und der Datenverarbeitungsanalyse bietet z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1990. PP. 589-91, v.a. P. 590.

670 Das Signal kann dabei ein sog. „Aktionspotential“ (engl. "action potential") eines Neurons oder auch ein sog. „lokales Feldpotential“ (engl. "Local Field Potential (LFP)") einer Neuronenpopulation sein.

S. z.B. A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1990. PP. 589-90.

S. auch Fn. 664-666.

671 S. auch N. SALARI / A. MAYE: Brain Waves: How Synchronized Neuronal Oscillations Can Explain the Perception of Illusory Objects. VDM Verlag Dr. Müller. Saarbrücken. 2008. PP. 26, 27 – U. FICKEL: Zeitliche Muster neuronaler Aktivität. Stimulusgekoppelte und intrinsisch generierte Komponenten. Dissertation. Universität Hamburg. 2007. S. 34.



Graphik.21: Schematisches Diagramm eines Kreuzkorrelationshistogramms: Wenn im Bereich um τ_{0ms} des Korrelationsfensters eines Signals $S_1(t)$ im Kreuzkorrelogramm besonders häufig Spikes im Signal $S_2(t)$ auftreten, dann erhält man einen (Zentral-)Gipfel (engl. "peak") im Korrelationshistogramm, was eine Synchronisation der Signale anzeigt, ansonsten bleibt die sich ergebende Kreuzkorrelation flach. Abschließend werden die Daten des Korrelogramms anhand einer GABOR-Funktion (hier: rot) approximiert, sodaß sich eine Oszillation einstellt (in Anlehnung an A.K. ENGEL / P. KÖNIG / C.M. GRAY / W. SINGER: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1990. P. 598).⁶⁷²

3.43 INTRAMODALE PERZEPTIVE INTEGRATION BEI ANDEREN SENSORISCHEN SYSTEMEN

Im Rahmen des ersten (Sub-)Problems der intramodalen perzeptiven Integration von sensorischen Informationen⁶⁷³ kann man nun das Assembly-Modell auch auf andere sensorische Systeme anwenden, wobei in der Tat in einer ganzen Reihe von Experimenten entsprechende präzise neuronale Synchronisationsphänomene nachgewiesen worden sind, z.B. im olfaktorischen Sy-

⁶⁷² S. auch N. SALARI / A. MAYE: Brain Waves: How Synchronized Neuronal Oscillations Can Explain the Perception of Illusory Objects. VDM Verlag Dr. Müller. Saarbrücken. 2008. P. 28.

⁶⁷³ Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.410.

stem⁶⁷⁴, im auditiven System⁶⁷⁵ und im somatosensorischen System⁶⁷⁶, „was wiederum die Vermutung nahelegt, daß die neuronale Synchronisation ganz generell für integrative Prozesse bedeutsam ist.“⁶⁷⁷

3.44 INTERMODALE INTEGRATION VON SENSORISCHEN INFORMATIONEN

Was das zweite (Sub-)Problem der intermodalen Integration von sensorischen Informationen betrifft⁶⁷⁸, konnten in den letzten Jahren von mehreren Arbeitsgruppen erste experimentelle Belege für die Synchronisationshypothese nachgewiesen werden.⁶⁷⁹

3.45 SENSOMOTORISCHE INTEGRATION VON NEURONALEN INFORMATIONEN

Was nun das dritte (Sub-)Problem der sensomotorischen Integration von neuronalen Informationen betrifft⁶⁸⁰, ist von mehreren Arbeitsgruppen anhand von experimentellen Befunden gezeigt worden, daß eine neuronale Synchronisation zwischen den somatosensorischen und den motorischen Kortextarealen auftritt, u.z. bei Katzen⁶⁸¹, bei Affen⁶⁸² und sogar beim Menschen⁶⁸³, was darauf hindeutet, daß die Synchronisation von neuronalen Impulsen „für die selektive Koordination sensorischer und motorischer Verhaltensaspekte wesentlich sein könnte.“⁶⁸⁴

674 S. z.B. G. LAURENT: Dynamical Representation of Odors by Oscillating and Evolving Neural Assemblies. *Trends in Neuroscience*. Vol. 19. 1996. PP. 489-96.

675 S. z.B. R.C. DeCHARMS / M.M. MERZENICH: Primary Cortical Representation of Sounds by the Coordination of Action-Potential Timing. *Nature*. Vol. 381. 1996. PP. 610-12.

676 S. z.B. V.N. MURTHY / E.E. FETZ: Coherent 25- to 35-Hz Oscillations in the Sensorimotor Cortex of Awake Behaving Monkeys. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 89. 1992. PP. 5670-74.

677 S. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 74.

678 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.410.

679 S. z.B. D. SENKOWSKI / T.R. SCHNEIDER / J.J. FOXE / A.K. ENGEL: Crossmodal Binding through Neural Coherence: Implications for Multisensory Processing. *Trends in Neurosciences*. Vol. 31. 2008. PP. 401-409, v.a. PP. 406-407 m.w.Ltr.

680 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.410.

681 S. z.B. P.R. ROELFSEMA / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Interareal Synchronization Between the Visual, Parietal and Motor Cortex of the Awake Cat. *European Journal of Neuroscience*. Supplement 8. 1995. P. 112 – P.R. ROELFSEMA / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER: Visuomotor Integration is Associated with Zero Time-Lag Synchronization Among Cortical Areas. *Nature*. Vol. 385. 1997. PP. 157-61.

S. auch W.A. MacKAY: Synchronized Neuronal Oscillations and their Role in Motor Processes. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 1. 1997. PP. 176-83.

682 S. z.B. V.N. MURTHY / E.E. FETZ: Coherent 25- to 35-Hz Oscillations in the Sensorimotor Cortex of Awake Behaving Monkeys. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 89. 1992. PP. 5670-74.

683 S. z.B. S.F. FARMER: Rhythmicity, Synchronization and Binding in Human and Primate Motor Systems. *Journal of Physiology*. Vol. 509. 1998. PP. 3-14, v.a. PP. 5-7.

684 S. Fn. 677.

3.46 NEURONALE SYNCHRONISATION UND (VISUELLE) AUFMERKSAMKEIT(-SMECHANISMEN)

3.461 In ihrer Gesamtheit betrachtet zeigen eine Vielzahl der bereits angeführten Experimente, daß die neuronalen Synchronisationsprozesse, die in den verschiedenen sensorischen Arealen auftreten, nicht nur von den verarbeitenden äußeren Reizen abhängen, sondern auch in sehr großem Ausmaß von systeminternen, dynamischen Faktoren, wie z.B. der Aufmerksamkeit, dem Gedächtnis oder der Motivation, bestimmt werden. Insbesondere berichten eine Mehrzahl von an wachen Affen durchgeführten Studien⁶⁸⁵, daß sich die Synchronisationseffekte in dem Fall verstärkten, wenn die Neuronen im visuellen bzw. somatosensorischen Kortex Informationen über einen besonders wichtigen Reiz kodierten, den das Versuchstier mit Aufmerksamkeit entweder betrachtet bzw. betastet hatte, und sie sich in dem Fall abschwächten, wenn die Aufmerksamkeit des Versuchstiers einem anderen Reiz galt. Diese Ergebnisse lassen somit den Schluß zu, daß Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozesse mit einer Modulation der neuronalen Synchronisationseffekte bei Neuronen einhergehen, die an der Verarbeitung desselben Reizes beteiligt sind, sodaß dies dazu führen könnte, daß, zum einen, die anhand von synchronen Assemblies kodierten Informationen in einem früheren sensorischen Areal „mit hoher Präferenz“ in andere kortikale Zentren, z.B. in den sensorischen Assoziationskortex bzw. in den prämotorischen Kortex, weitergeleitet und dort bevorzugt weiterverarbeitet werden, „ein Funktionsprinzip, das man als 'saliency by synchrony' bezeichnen könnte.“⁶⁸⁶

Zum anderen könnte dies dazu führen, daß synchron strukturierte Aktivität in späteren kortikalen Zentren die Entstehung von neuronalen Synchronisationsprozessen in früheren sensorischen Arealen vorbereiten, noch bevor ein neuer Reiz eintrifft und verarbeitet wird, sodaß diese „zeitlichen Kopplungsmuster“ geeignet sein könnten, um einen „Abgleich“ von „neuronalen Vorhersagen“ bzw. von „Erwartung und Wirklichkeit herbeizuführen“, wodurch es über „einen Prozess der neuronalen ‚Resonanz‘“ zu einer „Selektion“ derjenigen neurona-

⁶⁸⁵ S. z.B. P. FRIES / J.H. REYNOLDS / A.E. RORIE / R. DESIMONE: Modulation of Oscillatory Neuronal Synchronization by Selective Visual Attention. *Science*. Vol. 291. 2001. PP. 1560-63 – A.K. ENGEL / P. FRIES / W. SINGER: Dynamic Predictions: Oscillations and Synchrony in Top-Down Processing. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 2. 2001. PP. 704-16, v.a. PP. 710-14.

Einen einführenden Überblick bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Neuropsychologie*. 2. Ed. Springer-Verl. Heidelberg. 2006. S. 63-64 – A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 231-32.

S. auch X.-J. WANG: Neural Oscillations. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Nature Publishing Group. London u.a. 2003. P. 279 – W. SINGER: The Role of Synchrony in Neocortical Processing and Synaptic Plasticity. In: F. DOMANY / J.L. van HEMMEN / K. SCHULTEN (Eds.): *Models of Neural Networks II. Temporal Aspects of Coding and Information Processing in Biological Systems*. Ch. 4. Springer-Verlag. New York u.a. 1994. PP. 162-63.

⁶⁸⁶ S. A.K. ENGEL: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): *Kognitive Neurowissenschaften*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. S. 75-76, v.a. S. 76.

len Signale käme, die Informationen enthalten, die dem jeweiligen (Handlungs-)Kontext entsprechen würden – ein Funktionsprinzip, das man als sog. "dynamic contextual prediction" bezeichnen kann.⁶⁸⁷

3.462 Desweiteren lassen eine Vielzahl von EEG- und MEG-Untersuchungen⁶⁸⁸ an Menschen die Vermutung zu, daß die neuronalen Synchronisationsprozesse selbst für eine erhöhte Wachheit (sog. „Vigilanz“ (engl. "vigilance")⁶⁸⁹) und für die Steuerung der Aufmerksamkeit und damit für die Selektion der neuronalen Signale „von großer Bedeutung sind“⁶⁹⁰, sodaß dies die Annahme stützt, daß die „zeitliche Bindung eine Voraussetzung für die bewußte Wahrnehmung darstellt“⁶⁹¹: Belegt wird dies z.B. anhand eines Experiments⁶⁹² an (wachen) Katzen, wobei gezeigt werden konnte, daß die Neuronen des visuellen Kortex mit denen in der subkortikalen Struktur des Colliculus superior synchronisieren, wodurch die Auswahl von Zielen für die Augenbewegungen festgelegt worden war.

3.463 Dies kommt dem neuropsychologischen Modell der britisch-U.S.-amerikanischen Psychologin Anne M. TREISMAN mit ihrer sog. „Merkmalsintegrationstheorie (MIT) der (visuellen) Aufmerksamkeit“ (engl. "Feature-Integration Theory (FIT) of (Visual) Attention")⁶⁹³ nahe, das besagt, daß die erforderliche Bindung zwischen den verschiedenen neuronalen Impulsen die (visuelle) Aufmerksamkeit übernehmen würde, wohingegen sie selbst der (Synchronisations-)Bindungshypothese eher skeptisch gegenübersteht.⁶⁹⁴

687 S. Fn. 686.

688 S. z.B. D. SCHWENDER / C. MADLER / S. KLASING / K. PETER / E. PÖPPEL: Anesthetic Control of 40-Hz Brain Activity and Implizit Memory. *Consciousness and Cognition*. Vol. 3. 1994. PP. 129-47 – C. TALLON-BAUDRY / O. BERTRAND / C. DELPUECH / J. PERNIER: Oscillatory Gamma-Band (30-70 Hz) Activity Induced by a Visual Search Task in Humans. *Journal of Neuroscience*. Vol. 17. 1997. PP. 722-34 – S. DEBENER / C.S. HERRMANN / C. KRANCZIOCH / D. GEMBRIS / A.K. ENGEL: Top-Down Attentional Processing Enhances Auditory Evoked Gamma Band Activity. *Neuroreport*. Vol. 14. 2003. PP. 683-86 – E. RODRIGUEZ / N. GEORGE / J.P. LACHAUX / J. MARTINERIE / B. RENAUULT / F.J. VARELA: Perception's Shadow: Long-Distance Synchronization of Human Brain Activity. *Nature*. Vol. 397. 1999. PP. 430-33.

Eine Übersicht bietet z.B. Chr.S. HERRMANN / M.H.J. MUNK / A.K. ENGEL: Cognitive Functions of Gamma-Band Activity: Memory Match and Utilization. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 8. 2004. PP. 347-55.

689 Zum Begriff der sog. „Vigilanz“ (engl. "vigilance") s. z.B. R. PARASURAMAN: Vigilance, Monitoring and Search. In: J.R. BOFF / L. KAUFMANN / J.P. THOMAS (Eds.): *Handbook of Perception and Human Performance*. Vol. 2. Cognitive Processes and Performance. Wiley. New York. 1986. PP. 431-43-39.

690 S. z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 231-32 – W. SINGER: Neuronal Synchronization: A Solution to the Binding Problem. In: R.R. LLINÁS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): *The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes*. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 100-30.

691 S. Fn. 690.

692 S. z.B. M. BRECHT / W. SINGER / A.K. ENGEL: Patterns of Synchronization in the Superior Colliculus of Anesthetized Cats. *Journal of Neuroscience*. Vol. 19. 1999. PP. 3567-79 – M. BRECHT / W. SINGER / A.K. ENGEL: Amplitude and Direction of Saccadic Eye Movements Depend on the Synchronicity of Collicular Population Activity. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 92. 2004. PP. 424-32, v.a. PP. 428-32.

693 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.32.

694 S. z.B. A. TREISMAN: The Binding Problem. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 6. 1996. PP. 171-

3.47 KRITIK DER BINDING-BY-SYNCHRONY HYPOTHESIS UND DES ASSEMBLY-MODELLS

3.470 Die (Synchronisations-)Bindungshypothese (engl. "binding-by-synchrony hypothesis") W. SINGER's, A.K. ENGEL's und P. KÖNIG's et. al. mit ihrem temporalen Synchronisationsmechanismus ist nun in der Literatur⁶⁹⁵ vielfach kritisiert worden:

3.471 Eine Übersicht über eine Reihe von gewichtigen theoretischen Argumenten gegen die zeitliche Bindungshypothese (engl. "temporal binding hypothesis")⁶⁹⁶ ist dabei von dem U.S.-amerikanischen (Neuro-)Biologen und Mediziner Michael N. SHADLEN und dem (Experimental-)Psychologen J. Anthony MOVSHON⁶⁹⁷ zusammengestellt worden: Ein erstes Argument betrifft den Umstand, daß es sich bei der Binding-By-Synchrony Hypothese nicht um eine Theorie handelt, die die betreffenden komputationalen Algorithmen beschreibe, die die neuronalen Signalimpulse zu einer synchronen Aktivität strukturiert, sondern, daß sie nur das Ergebnis der Bindungsberechnungen beschreibe als eine Repräsentation von synchroner neuronaler Aktivität.⁶⁹⁸ Ein zweites Argument betrifft die neuroanatomischen Daten, daß nach bisherigen Untersu-

78, v.a. PP. 174-75 – A. TREISMAN: Solutions to the Binding Problem: Progress through Controversy and Convergence. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 107-10.

695 S. z.B. M.N. SHADLEN / W.T. NEWSOME: Noise, Neural Codes and Cortical Organization. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 4. 1994. PP. 569-79.

S. auch W.A. PHILLIPS / W. SINGER: In Search of Common Foundations for Cortical Computation. *The Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 657-722.

Einen eingehenden Überblick findet man z.B. in der Zeitschrift *Neuron* Vol. 24. 1999 PP. 7-125, v.a. in M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 67-77, und in der Zeitschrift *Consciousness and Cognition* Vol. 8 1999 PP. 128-268, v.a. in A.K. ENGEL / P. FRIES / P. KÖNIG / M. BRECHT / W. SINGER: Does Time Help to Understand Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 262-63, desweiteren in dem Sammelband von A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003.

Einen einführenden Überblick bietet z.B. A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 233-36

– G. PARETI / A. De PALMA: Does the Brain Oscillate? The Dispute on Neuronal Synchronization. *Neurological Sciences*. Vol. 25. 2004. PP. 41-47 – R. GOEBEL: Synchrone Oszillationen in visuellen Systemen und in neuronalen Netzwerk-Modellen. In: I. DUWE / F. KURFESS / G. PAASS / G. PALM / H. RITTER / S. VOGEL (Hrsg.): *Konnektionismus und Neuronale Netze. Beiträge zur Herbstschule (HeKoNN'94)*. Münster/Westfalen, 10.-14. Oktober 1994. GMD-Studien. Nr. 242. 1994. S. 313-15.

S. auch A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002. S. 36-37.

696 S. M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 67, 68, die damit die oben beschriebenen Forschungsvorhaben W. SINGER's und R. ECKHORN's mit ihren Arbeitsgruppen bezeichnen.

697 S. M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 67-77.

S. auch darauf Bezug nehmend R.C. O'REILLY / R.S. BUSBY / R. SOTO: Three Forms of Binding and their Neural Substrates: Alternatives to Temporal Synchrony. In: A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003. PP. 168-90, v.a. PP. 170-72.

698 S. M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 68.

chungen die Organisation der Rückkopplungsprojektionen aus den höheren kortikalen Arealen nicht die geforderten sehr präzisen und dynamisch konfigurierbaren Verbindungen aufweise, sodaß z.B. eine objektbasierte Synchronisation entstehen könnte zwischen den objektkonstituierenden Neuronen im temporalen Kortex und den Neuronen im primären visuellen Kortex, die die entsprechenden Elemente eines Objekts kodieren.⁶⁹⁹ Ein drittes Argument verweist auf die realistische Konstruktion einer kortikalen Architektur, wonach ein Neuron in einer kortikalen Kolumne im Prinzip bereits in ein Netzwerk aus neuronalen Signalen mit einem hohen Grad an Konvergenz eingebettet sei, sodaß in einem Zeitfenster von 5-10 Millisekunden die einlaufenden Impulse von benachbarten Neuronen allein auf Grund des kortikalen Designs synchron seien bzw. das daraus sich ergebende Antwortverhalten der betreffenden Neuronen schon auf Grund dieser ähnlichen Umgebungsbedingungen synchron sei, weshalb dem Synchronisationsphänomen keine besondere Bedeutung zukommen würde, sofern man nicht ein Zeitfenster von nur 3 Millisekunden oder weniger betrachten würde, was jedoch nur selten experimentell belegt sei.⁷⁰⁰

3.472 Eine weitere Übersicht über eine Reihe von gewichtigen theoretischen Argumenten und Gegenargumenten die Binding-By-Synchrony Hypothese betreffend ist nun von A.K. ENGEL⁷⁰¹ zusammengestellt worden: Ein viertes Argument behandelt den Einwand der U.S.-amerikanischen Philosophin und Kognitionswissenschaftlerin Valerie G. HARDCASTLE⁷⁰², daß die mit den Experimenten zur binokularen Rivalität⁷⁰³ beobachtete Korrespondenz zwischen dem neuronalen Synchronisationsphänomen und dem der perzeptiven Selektion keine kausale Relation darstelle, sondern daß „im besten Falle eine Kovarianz zwischen diesen Phänomenen“ bestünde, sodaß die synchrone Aktivität – als ein in Betracht zu ziehendes „neuronaes Korrelat des Bewußtseins“ (engl.

699 S. M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. P. 69 mit Hinweis auf P.A. SALIN / J. BULLIER: Cortico-cortical Connections in the Visual System: Structure and Function. *Physiological Reviews*. Vol. 75. 1995. PP. 107-54.

700 S. M.N. SHADLEN / J.A. MOVSHON: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 70-71 unter Hinweis auf Chr. KOCH: *Biophysics of Computation*. Oxford University Press. New York. 1999 und Chr. von der MALSBURG: *The Correlation Theory of Brain Function*. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology. Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry. Göttingen. 1981 und in: F. DOMANY / J.L. van HEMMEN / K. SCHULTEN (Eds.): *Models of Neural Networks*. 1994. Ch. 2. PP. 95-119.

701 S. A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 233-36.

702 S. V.G. HARDCASTLE: On Being Importantly Necessary for Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 152-54, v.a. P. 153 – V.G. HARDCASTLE: The Binding Problem. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. PP. 559-61 – V.G. HARDCASTLE: Psychology's Binding Problem and Possible Neurobiological Solutions. *Journal of Consciousness Studies*. Vol. 1. 1994. PP. 76-79.

S. auch V.G. HARDCASTLE: *Consciousness and the Neurobiology of Perceptual Binding*. *Seminars in Neurology*. Vol. 17. 1997. PP. 163-70.

Zur Kritik anderer Autoren zur funktionellen Relevanz des Synchronisationsphänomens s. das ASSC Seminar on "Temporal Binding, Binocular Rivalry and Consciousness" aus dem Jahr 1997.

703 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.424.03.

“neuronal correlate of consciousness”)⁷⁰⁴ – nicht direkt kausal relevant für die Entstehung von Bewußtsein sei, sondern lediglich ein „distaler“ (engl. “distal”) Kausalfaktor dafür sei. Dem wird von A.K. ENGEL⁷⁰⁵ entgegengehalten, daß dieses Argument gemäß den wissenschaftstheoretischen Standards nur dann entkräftet werden könne, wenn es gelänge, Experimente zu konstruieren, in denen die Synchronisationseffekte selektiv manipuliert werden könnten ohne die anderen Eigenschaften von visuellen Verarbeitungsprozessen zu beeinträchtigen, was jedoch experimentell bei Säugetieren mit sehr großen Schwierigkeiten verbunden sei, weshalb erst wenige experimentelle Hinweise bzw. Belege dieser Art erbracht worden seien.⁷⁰⁶ Ein fünftes Argument betrifft den Einwand, daß die Synchronisationshypothese nicht erklären könne, weshalb die beschriebene zeitliche Bindung zwar eine notwendige Bedingung, aber keine hinreichende Bedingung für das Auftreten von (selbst-)bewußtem Erleben darstelle, sodaß man – wie A.K. ENGEL⁷⁰⁷ einräumt – die betreffenden Kriterien anhand umfassenderer Bewußtseinstheorien, wie z.B. dem von J. NEWMAN und B.J. BAARS⁷⁰⁸ oder dem von Fr. CRICK und Chr. KOCH⁷⁰⁹, auffinden müsse, wonach sensorische Informationen nur dann zu einer bewußten Wahrnehmung beitragen, wenn zumindest eine neuronale Aktivität zu einer expliziten Repräsentation integriert wird, und die präfrontalen Kortexareale über einen hinreichend langen Zeitraum aktiv in den Informationsfluß mit eingebunden werden. Ein sechstes Argument behandelt den Einwand des Neurologen Martin KURTHEN⁷¹⁰, daß die vorliegenden neurophysiologischen

704 S. hierzu z.B. W. SINGER: *Consciousness and Neuronal Synchronization*. St. LAUREYS / G. TONONI: *The Neurology of Consciousness: Cognitive Neuroscience and Neuropathology*. Elsevier. Amsterdam u.a. 2009.

705 S. A.K. ENGEL: *Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein*. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 235.

S. auch A.K. ENGEL / P. FRIES / P. KÖNIG / M. BRECHT / W. SINGER: *Does Time Help to Understand Consciousness*. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. PP. 262-63 und U. FICKEL: *Zeitliche Muster neuronaler Aktivität. Stimulusgekoppelte und intrinsisch generierte Komponenten*. Dissertation. Universität Hamburg. 2007. S. 11-12.

706 S. z.B. das bereits erwähnte Mikrostimulationsexperiment am Colliculus superior von M. BRECHT / W. SINGER / A.K. ENGEL: *Amplitude and Direction of Saccadic Eye Movements Depend on the Synchronicity of Collicular Population Activity*. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 92. 2004. PP. 424-32, v.a. PP. 428-32.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.344.

S. auch K. MacLEOD / G. LAURENT: *Distinct Mechanisms for Synchronization and Temporal Patterning of Odor-Encoding Neural Assemblies*. *Science*. Vol. 274. 1996. PP. 976-79.

707 S. A.K. ENGEL: *Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein*. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 236.

708 S. z.B. J. NEWMAN / B.J. BAARS: *A Neural Attentional Model for Access to Consciousness: A Global Workspace Perspective*. *Concepts in Neuroscience*. Vol. 4. 1993. PP. 255-90.

709 S. z.B. Fr. CRICK / Chr. KOCH: *A Framework for Consciousness*. *Nature Neuroscience*. Vol. 6. 2003. PP. 119-26 – Chr. KOCH: *The Quest for Consciousness. A Neurobiological Approach*. Roberts. Denver/Co. 2004.

710 S. M. KURTHEN: *Conscious Behaviour Explained*. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 156-57.

Daten zur binokularen Rivalität⁷¹¹ sich, prinzipiell, nur über indirekte Korrelationen, u.z. vermittelt über eine aus der Dritten-Person-Perspektive zugängliche naturalistische Theorie des bewußten Verhaltens, auf die subjektiven Erlebnisaspekte von Bewußtsein im engeren Sinn beziehen könne, das den Zugang zu den phänomenalen Zuständen aus der privaten Ersten-Person-Perspektive einer individuellen Person bezeichnet. Diesem Einwand, beruhend auf dem aus der Philosophie stammenden sog. „Argument von der Erklärungslücke“ (engl. „explanatory gap argument“)⁷¹², eingeführt von dem U.S.-amerikanischen Philosophen Joseph LEVINE⁷¹³, kann man nun mit A.K. ENGEL⁷¹⁴ entgegenhalten, daß, erstens, sofern private phänomenale Sachverhalte einer relationalen oder funktionalen Analyse unterzogen werden können⁷¹⁵, eine Theorie der „neuronalen Korrelate bewussten Verhaltens (...) weitgehend koextensiv mit einer Theorie der neuronalen Korrelate des Bewußtseins“ sein könnte, und daß, zweitens, sich – wie M. KURTHEN⁷¹⁶ selbst betont – anführen läßt, daß „die neuro- und kognitionswissenschaftliche Forschung langfristig selbst zu einer Veränderung des Explanandum ‚Bewusstsein‘ führen kann und wird“, sodaß „unter dem Einfluss einzelwissenschaftlicher Forschung“ diese ‚Erklärungslücken‘ „weniger gravierend erscheinen [werden].“

3.473 Abschließend wird die Binding-By-Synchrony Hypothesis anhand von empirischen (Gegen-)Befunden von einer Vielzahl von Autoren kritisiert⁷¹⁷, wobei z.B. argumentiert wird, daß

(1) nach Y. DONG, S. MIHALAS, F. QIU, R. von der HEYDT und E. NIEBUR⁷¹⁸ die

711 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.424.03.

712 Das sog. „Argument von der Erklärungslücke“ (engl. „explanatory gap argument“) besagt, daß, von einer epistemischen Position aus betrachtet, die auf eine bestimmte subjektiv erlebte Weise erfahrenen phänomenalen (Bewußtseins-)Gehalte, d.h. die mentalen Eigenschaften und Zustände, die sog. „Qualia“ (engl. „qualia“), die daher (nur) aus der Ersten-Person-Perspektive zugänglich sind, grundsätzlich nicht durch eine vollständige naturwissenschaftliche, z.B. eine neuro- bzw. kognitionswissenschaftliche, Theorie (reduktiv) erklärt werden können, die (nur) aus der Dritten-Person-Perspektive wissenschaftlich beschrieben wird.

S. Einführend hierzu z.B. D. CHALMERS: Facing up to the Problem of Consciousness. *Journal of Consciousness Studies*. Vol. 2. 1995. 200-219.

713 S. J. LEVINE: Materialism and Qualia: The Explanatory Gap. *Pacific Philosophical Quarterly*. Vol. 64. 1983. PP. 354-61.

714 S. A.K. ENGEL: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): *Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik*. Wilhelm Fink Verl. München. 2005. S. 233-34.

S. auch A.K. ENGEL / P. FRIES / P. KÖNIG / M. BRECHT / W. SINGER: Does Time Help to Understand Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. PP. 261-62.

715 S. z.B. D.CI. DENNETT: Quining Qualia. In: W.G. LYCAN (Ed.): *Mind and Cognition. A Reader*. Blackwell. Oxford. 1990. PP. 519-47.

716 S. M. KURTHEN: Conscious Behaviour Explained. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 157-58.

717 Eine Übersicht bietet z.B. A. BARTELS: Visual Perception: Converging Mechanisms of Attention, Binding, and Sequention? *Current Biology*. Vol. 19. 2009. PP. R300-302.

718 S. Y. DONG / S. MIHALAS / F. QIU / R. VON DER HEYDT / E. NIEBUR: Synchrony and the Binding Problem in Macaque Visual Cortex. *Journal of Vision*. Vol. 8. 2008. PP. 1-16, v.a. PP. 15-17: “An important result of our study is that neurons fail to show significant synchrony in the binding condition despite the fact that the majority of these neurons signal border ownership by their firing rate. (...) This finding is direct evidence that border ownership coding is feature binding: attent-

Kodierung der Objektgrenze (engl. "border ownership coding") mittels einer einfachen Erhöhung der mittleren Feuerrate vorgenommen wird in Verbindung mit einer rückgekoppelten Aufmerksamkeitsmodulation, und die vorgefundene synchrone Aktivität nur die Zugehörigkeit zu einem besonderen Netzwerk anzeige,

- (2) nach V.A.F. LAMME / H. SPEKREIJSE zwar eine erhöhte synchrone Aktivität von Neuronen im Areal V1 bei Primaten vorgefunden, wenn sich die Orientierung der Liniensegmente des zu kodierenden Objekts im Vergleich zu denen des Hintergrundes um 90° unterscheiden, wobei dies aber als ein Reflex der Funktionsweise von horizontalen Verbindungen einer Kolumne zurückgeführt wird.⁷¹⁹ Damit einhergehend wird nach P.R. ROELFSEMA, V.A. LAMME und H. SPEKREIJSE⁷²⁰ vielmehr eine simultane Erhöhung der Frequenz von Neuronen im Areal V1 bei Makaken gemessen, die daher – als ein neurales Korrelat für die visuelle Aufmerksamkeit und somit in Einklang mit der Feature-Integration Theory of (Visual) Attention A.M. TREISMAN's⁷²¹ – für die Eigenschaftsbindung verantwortlich sei (engl. "binding-by-rate enhancement hypothesis"),
- (3) nach A. THIELE und G. STONER⁷²² im kortikalen Areal MT beim Makaken eine

ion to a figure produces selective enhancement of the edge signals assigned to that figure. Thus, the border ownership circuits serve as a binding mechanism, enabling object-based attention. In this mechanism binding is represented by firing rate, and synchrony (...) is a byproduct of this mechanism."

S. auch F. FANG / H. BOYACI D. KERSTEN: Border Ownership Selectivity in Human Early Visual Cortex and its Modulation by Attention. *Journal of Neuroscience*. Vol. 29. 2009. PP. 460-65 – F.T. QIU / T. SUGIHARA / R. von der HEYDT: Figure-Ground Mechanisms Provide Structure for Selective Attention. *Nature Neuroscience*. 2007. Vol. 10. PP. 1492-99 – H. ZHOU / H.S. FRIEDMAN / R. von der HEYDT: Coding of Border Ownership in Monkey Visual Cortex. *Journal of Neuroscience*. Vol. 20. 2000. PP. 6594-6611.

- 719 S. V.A.F. LAMME / H. SPEKREIJSE: Neuronal Synchrony does not Represent Texture Segregation. *Nature*. Vol. 396. 1998. PP. 362-66, v.a. P. 365: "A difference in synchrony is only observed between the three conditions when there is a 90° difference in orientation between the figure texture and the ground texture. This result could be interpreted as partial support for the hypothesis that synchrony is reflecting perceptual organization. A more parsimonious explanation, however, is to view synchrony as reflecting the horizontal connections within V1. It is known that these connections preferentially link sites that have similar orientation tuning. Therefore, less synchrony is to be expected when two sites are stimulated with orthogonal orientations, compared with when two sites are stimulated with identical (...) or similar (20°) orientations. (...)

The general hypothesis that synchrony represents the binding of local features into global structures, however, is falsified by our results."

- 720 S. P.R. ROELFSEMA / V.A. LAMME / H. SPEKREIJSE: Synchrony and Covariation of Firing Rates in the Primary Visual Cortex During Contour Grouping. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 982-91, v.a. P. 988: "According to this binding-by-rate enhancement hypothesis, features of a single perceptual object are bound if the neurons encoding them jointly enhance their responses. Our results support this hypothesis, as neuronal responses to contours that were grouped together are indeed simultaneously enhanced in area V1. (...) Psychophysical results in human subjects indicate that the enhancement of neuronal responses is a correlate of visual attention (...). (...) There is a conceptual link between binding-by-rate enhancement and the feature integration theory."

- 721 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.32.

- 722 S. A. THIELE / G. STONER: Neuronal Synchrony does not Correlate with Motion Coherence in Cor-

erhöhte synchrone Aktivität gerade nicht bei kohärenten (Karo-)Strukturen des Stimulus erfolgte, sondern bei den nicht-kohärenten Mustern,

- (4) nach B.J.A. PALANCA und G.C. DeANGELIS⁷²³ im kortikalen Areal MT bei Primaten eine stark signifikante neurale Synchronizität nur bei Neuronen mit sich überlappenden, kollinearen rezeptiven Feldern festgestellt werden konnte, und schließlich
- (5) nach M. RIESENHUBER und T. POGGIO⁷²⁴ mit ihrem sog. „Hierarchischen Modell der Objekterkennung“ (engl. “Hierarchical Model of Object Recognition“) im Rahmen eines sog. statischen (Bindungs-)Modells (engl. “static binding model“) ⁷²⁵, irgendwelche Oszillations- und Synchronisationsmechanismen nicht notwendig seien, da, aufbauend auf einer “simple

tical Area MT. *Nature*. Vol. 421 (6921). 2003. PP. 366-70, v.a. P. 369: “Stimulus-induced synchrony was in fact greatest, not for coherent plaids, but for noncoherent plaids.”

723 S. B.J.A. PALANCA / G.C. DeANGELIS: Does Neuronal Synchrony Underlie Visual Feature Grouping. *Neuron*. Vol. 46. 2005. PP. 333-46, v.a. P. 343: “(...) our results from area MT suggest that the BBS hypothesis, in its strongest form does not hold. For nonoverlapping, noncollinear RFs (= receptive fields; A.d.V.), synchrony is not a reliable predictor of feature grouping. Among neurons with overlapping or collinear RFs, synchrony may contribute to perceptual feature grouping or may simply be a reflection of local cortical connectivity.”

724 S. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Are Cortical Models Really Bound by the “Binding Problem”? *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 87-93, v.a. PP. 90, 93: “The MAX mechanism performs an input-driven selection (and possibly scanning) operation over its inputs that might have interesting implications for the pop-out effect (...): as the MAX operation is performed in parallel over many neurons, detection of stimuli does not require an attention-controlled ‘focused’ search, (...), if surrounding stimuli do not interfere with the VTU’s [view-tuned units] preferred object. Therefore, for objects that activate different features (...), recognition is possible without sequential search – the stimuli ‘pop out.’ However, in the case of interference, as in a display consisting of many similar paperclips, detection might require ‘focusing attention’ (...) to reduce the influence of competing stimuli. In this case, there would be no pop-out, but rather sequential search would be required to perform successful recognition.

The observed invariance ranges of IT cells after training with one view are reflected in the architecture used in our model: one of its underlying ideas is that invariance and feature specificity have to grow hierarchically so that view-tuned cells at higher levels show sizable invariance ranges even after training with only one view, as a result of the invariance properties of the afferent units. The key concept is to start with simple localized features – since the discriminatory power of simple features is low, the invariance range has to be kept correspondingly low to avoid the cells being activated indiscriminately. As feature complexity and thus discriminatory power grows, the invariance range, i.e., the size of the receptive field, can be increased as well. Thus, loosely speaking, feature specificity and invariance are inversely related, which is one of the reasons the model avoids a combinatorial explosion in the number of cells: while there is a larger number of different features in higher layers, there do not have to be as many neurons responding to these features as in lower layers, since higher-layer neurons have bigger receptive fields and respond to a greater range of scales. Notice also that the cells in the model are not binary but have continuous response functions, greatly increasing the representational power of the system.”

Grundlegend zum sog. “Hierarchical Model of Object Recognition“ s. z.B. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 1019-25, v.a. P. 1021 – T. POGGIO / S. EDELMAN: A Network that Learns to Recognize 3D Objects. *Nature*. Vol. 343. 1990. PP. 263-66.

Einführend s. z.B. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Are Cortical Models Really Bound by the “Binding Problem”? *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 88-90.

725 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.30 Fn. 540.

hierarchical feed-forward architecture⁷²⁶, bestehend aus einer Hierarchie von sog. "simple cells", "complex cells", "composite feature cells", "complex composite cells" und "view-tuned cells", eine nichtlineare sog. „MAX-Funktion“ (engl. "MAX (pooling) function")⁷²⁷ i.S. eines aktiven Selektionsmechanismus die Aktivität eines Neurons dadurch bestimmt, daß die Stimulusinformation bevorzugt wird, die das jeweilige Neuron am stärksten erregt, d.h., daß die höchste Feuerrate erzeugt, sodaß das Kriterium der Invarianz gewährleistet werde, was anhand von neurophysiologischen Daten belegt zu sein scheint.⁷²⁸

3.48 FAZIT

Zusammenfassend kann man als Fazit festhalten, daß nach W. SINGER, A.K. ENGEL, P. KÖNIG et. al.⁷²⁹ die neuronale Informationsverarbeitung durch zwei komplementäre Kodierungsmechanismen bzw. -strategien charakterisiert ist,

726 S. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. Nature Neuroscience. Vol. 2. 1999. PP. 1020, 1021.

727 S. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. Nature Neuroscience. Vol. 2. 1999. P. 1020: "There are two alternative idealized pooling mechanisms, linear summation ('SUM') with equal weights (to achieve an isotropic response), and a nonlinear maximum operation ('MAX'), where the strongest afferent determines the postsynaptic response. In both cases, the response of a model complex cell to a single bar in the receptive field is position invariant. The response level would signal similarity of the stimulus to the preferred features of the afferents. Consider now the case of a complex stimulus, like a paperclip, in the visual field. In the case of linear summation, responses of a complex cell would be invariant as long as the stimulus stayed in the cell's receptive field, but the response level now would not allow one to infer whether there actually was a bar of the preferred orientation somewhere in the complex cell's receptive field, as the output signal is a sum over all the afferents. That is, feature specificity is lost. In the MAX case, however, the response would be determined by the most active afferent and, hence, would signal the best match of any part of the stimulus to the afferents' preferred feature. This ideal example suggests that the MAX mechanism provides a more robust response in the case of recognition in clutter or with multiple stimuli in the receptive field."

728 S. M. RIESENHUBER / T. POGGIO: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. Nature Neuroscience. Vol. 2. 1999. P. 1021, die sich dabei auf T. SATO: Interactions of Visual Stimuli in the Receptive Fields of Inferior Temporal Neurons in Awake Monkeys. Experimental Brain Research. Vol. 77. 1989. PP. 23-30 berufen: "MAX-like mechanisms at some stages of the circuitry seem compatible with neurophysiological data. For instance, when two stimuli are brought into the receptive field of an IT neuron, that neuron's response seems dominated by the stimulus that, when presented in isolation to the cell, produces a higher firing rate – just as expected if a MAX-like operation is performed at the level of this neuron or its afferents."

729 S. z.B. P. UHLHAAS / B. PIPA / L. LIMA / S. MELLONI / S. NEUENSCHWANDER / D. NIKOLIC / W. SINGER: Neural Synchrony in Cortical Networks: History, Concept and Current Status. Frontiers in Integrative Neuroscience. Vol. 3. 2009. PP. 7-8 unter Hinweis auf J. BIEDERLACK / M. CASTELO / S. NEUENSCHWANDER / D.W. WHEELER / W. SINGER / D. NIKOLIC: Brightness Induction: Rate Enhancement and Neuronal Synchronization as Complementary Codes. Neuron. Vol. 52. 2006. PP. 1073-1083 – W. SINGER: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 49-50, 56-57.

S. auch z.B. W. SINGER: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 102-103 – W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 2002. S. 155-60.

um das Bindungsproblem zu lösen: Zum einen wird die Analyse von elementaren Objektmerkmalen anhand der klassischen Kodierungsstrategie vorgenommen, wonach sich die durchschnittliche Frequenz der Aktionspotentiale der aktiven Neurone erhöht, sodaß diese erhöhte neuronale Aktivität über die effektivere Summation der synaptischen Potentiale in den nachgeschalteten Neuronenstrukturen die Wahrscheinlichkeit erhöht, daß die betreffende Information für eine gemeinsame Weiterverarbeitung ausgewählt wird, sodaß dies über die Klasse von aufsteigenden, erregenden Verbindungen, z.B. der retinofugalen Projektion, anhand der wiederholten Rekombination und der selektiven Konvergenz von Eingangssignalen zur Herausbildung von Neuronen mit zunehmend spezifischeren Merkmalspräferenzen führt, z.B. Neuronen in V1.

Daneben gibt es jedoch eine zweite, weitaus mächtigere Klasse von Verbindungen, die cortico-corticalen des Neocortex, die, indem diese merkmalsempfindlichen Neurone reziprok miteinander gekoppelt sind, anhand des dynamischen Gruppierungsmechanismus der Populationskodierung für die flexible Assoziation dieser räumlich verteilten Neuronen zu funktionell kohärenten und synchron aktiven Assemblies zuständig ist, sodaß ganz unterschiedliche komplexe Konstellationen bzw. Konfigurationen von Perzeptkomponenten, z.B. in visuellen Szenen, in demselben Netzwerk nacheinander analysiert und repräsentiert werden können.

4. PROZESSTHEORIE EINER INTEGRATIVEN THEORIE DER (NEURO-)KOGNITION: VEKTORIELLE INFORMATIONSTHEORIE

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden vorab eine kurze Einführung in die auf dem Entropiebegriff basierende Informationstheorie gegeben (Kap. 4.1), die dann die Grundlage bildet sowohl für das Verständnis der zumeist informations- und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden im Konnektionismus (Kap. 4.2) als auch für die daran anschließend behandelten informationstheoretischen Modellkonzeptionen (Kap. 4.3). Abschließend wird noch auf zwei sehr bedeutende selbstorganisierte (Neuro-)Architekturen mit ihren entsprechenden Algorithmen eingegangen (Kap. 4.4), die das Problem der Klassifikation von wahrscheinlichkeitstheoretischer Information im Konnektionismus in grundlegender Weise angegangen haben.

4.1 THEORIE EINER (NEG-)ENTROPIEBASIERTEN INFORMATION

Es wird nun im Folgenden die Theorie einer (Neg-)Entropiebasierten Information in ihren Grundzügen kurz dargestellt und ihre Implikationen für eine konnektionistische Theorie der neurokognitiven Informationsverarbeitung skizziert:

4.10 THERMODYNAMISCHE ENTROPIE

Im Rahmen des sog. „Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik“⁷³⁰ verwendete der österreichische Physiker und Philosoph Ludwig BOLTZMANN den Begriff der sog. „(thermodynamischen) Entropie“ (engl. „(thermodynamic) entropy“)⁷³¹ als ein statistisches Ordnungsmaß, um „(Un-)Ordnung“ in einem thermodynamischen System operational zu messen, sodaß die phänomenologische Thermodynamik auf die Beschreibung einer statistischen Mechanik der (Gas-)Molekülkonfigurationen zurückgeführt werden konnte.⁷³²

In der Statistischen Mechanik⁷³³ wird demnach die (thermodynamische) Entropie S eines Makrozustandes als der Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit w eines thermodynamischen Systems definiert, einen bestimmten Mikrozustand einzunehmen:

730 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.230, Fn. 95.

731 Der Begriff der sog. „(thermodynamischen) Entropie“ (engl. „(thermodynamic) entropy“) stammt ursprünglich aus der Wärmelehre, wo er im Jahr 1850 von dem Physiker Rudolf CLAUSIUS zur Beschreibung von thermodynamischen Prozessen eingeführt worden war, und steht in folgendem Zusammenhang:

$$E = F + TS, \quad (33)$$

wobei E die (Gesamt-)Energie eines (geschlossenen) (Vielteilchen-)Systems bezeichnet, F die freie Energie, T die absolute Temperatur und S die Entropie als ein (Ordnungs-)Maß für den Bestandteil der (Gesamt-)Energie, der nicht – frei verfügbar – in einen gerichteten Energiefluß bzw. in Arbeit umgesetzt werden kann, sondern z.B. bei einer Wärmekraftmaschine als umgewandelte Wärme an die (System-)Umgebung abgegeben wird.

Eingehend hierzu s. z.B. W.J. MOORE: Grundlagen der Physikalischen Chemie. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1990. S. 133-60 – Chr. ARNDT: Information Measures. Information and its Description in Science and Engineering. Springer-Verl. Berlin u.a. 2001. PP. 85-94 – H. HAKEN: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. PP. 53-67.

Einführend hierzu s. z.B. I. PRIGOGINE: From Being to Becoming. Freeman. San Francisco. 1980. PP. 77-84 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 29-34.

Eine allgemeinverständliche Einführung bieten I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990. S. 125-130, 131-35, 202-15 – E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 55-59 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 127-32 – L. FLORIDI: Information. A Very Short Introduction. Oxford University Press. 2010. PP. 60-66 – W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band III. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 220-22, 235-37.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.3.03.

732 S. hierzu z.B. W.J. MOORE: Grundlagen der Physikalischen Chemie. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1990. S. 153-55.

733 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.24.

$$S = -k_B \ln w, \quad (34)$$

wobei k_B die sog. „BOLTZMANN-Konstante“ ist. Unter der Annahme, daß es sich um unterschiedliche Mikrozustände mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten w_i handelt, erhält man den allgemeineren Ausdruck:

$$S = -k_B \sum_i w_i \ln w_i. \quad (35)$$

4.11 (NEG-)ENTROPIEBASIERTE INFORMATIONSTHEORIE

Die Grundlegung der sog. „Informationstheorie“ (engl. “information theory”)⁷³⁴, basierend auf der Wahrscheinlichkeitstheorie (engl. “probability theo-

734 Grundlegend hierzu s. z.B. Th.M. COVER / J.A. THOMAS: Elements of Information Theory. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Hoboken/NJ. 2006 – M. BORDA: Fundamentals in Information Theory and Coding. Springer-Verl. Berlin u.a. 2011 – Chr. ARNDT: Information Measures. Information and its Description in Science and Engineering. Springer-Verl. Berlin u.a. 2001 – R. MATHAR: Informationstheorie, diskrete Modelle und Verfahren. Teubner-Verlag. Stuttgart. 1996. S. 22-42 – B. POMPE: Einführung in die Informationstheorie. Vorlesungsmanuskript. 1-semesterige Vorlesung für Studenten der Physik. Institut für Physik. Universität Greifswald. 2005. S. 1-112 – M. BOSSERT / R. JORDAN / J. FREUDENBERGER: Angewandte Informationstheorie. Vorlesungsmanuskript. Sommersemester 2002. S. 10-19.

Eingehend hierzu s. z.B. R.M. GRAY: Entropy and Information Theory. Springer-Verlag. New York. 2009 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Entropie – Information – Komplexität. SFB 230. Universität Stuttgart. Universität Tübingen. Stuttgart. 1995 – W. EBELING: Chaos – Ordnung – Information. Selbstorganisation in Natur und Technik. Verlag Harri Deutsch. Frankfurt am Main u.a. 1989 – M. BREMER / D. COHNITZ: Information and Information Flow. An Introduction. Ontos Verl. Frankfurt am Main u.a. 2004 – C.Fr. von WEIZSÄCKER: Aufbau der Physik. Deutscher Taschenbuch Verl. München. 1988. S. 165-68, 170-73 – C.Fr. von WEIZSÄCKER: Die Einheit der Natur. Studien. Deutscher Taschenbuch Verl. 1. Aufl. 1974. S. 346-52. Eine Einführung hierzu bietet z.B. H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 23-27, 44-48 – W.R. GLASER: Informationstheorie. In: J. FUNKE / P.A. FRENCH: Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Kognition. Bd. 5. Hogrefe. Göttingen u.a. 2006. S. 741-47 – Fr. SCHWEITZER: Selbstorganisation und Information. In: H. KRAPP / Th. WAGENBAUR (Hrsg.): Komplexität und Selbstorganisation. „Chaos“ in Natur- und Kulturwissenschaften. Wilhelm Fink Verl. München. 1997. S. 100-101 – P. RECHENBERG: Zum Informationsbegriff der Informationstheorie. Informatik Spektrum. Bd. 26. 2003. S. 318-20 – D. ELSTNER: Information als Prozess. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 8. 2010. S. 310-50.

Einen Überblick bietet z.B. K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verlag. Berlin. 1996.

Zur Etymologie des Begriffs der Information s. R. CAPURRO: Information. Ein Beitrag zur etymologischen und ideengeschichtlichen Begründung des Informationsbegriffs. Dissertation. Universität Düsseldorf. Verlag Sauer. München u.a. 1978 S. 204-13 – R. CAPURRO: On the Genealogy of Information. In: K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verl. Berlin. 1996. PP. 259-70 – R. CAPURRO / B. HJØRLAND: The Concept of Information. Annual Review of Information Science and Technology. Vol. 37. 2003. PP. 343-411 – R. CAPURRO: Einführung in den Informationsbegriff. 2000. From: <http://www.capurro.de/infovorl-index.htm>.

Zum Verhältnis zwischen der Informationstheorie und dem Konnektionismus s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 484-87, 535 Fn. 4 – J. RISSANEN: Information Theory and Neural Nets. In: P. SMOLENSKY /

ry") und Statistik (engl. "statistics"), kann man als den Versuch beschreiben, ausgehend von der mathematischen Definition des syntaktischen Informationsbegriffs⁷³⁵ anhand der Wahrscheinlichkeit, zwischen diesem syntaktisch-statistischen Informationsbegriff nach Cl.E. SHANNON⁷³⁶ in der Nachrichtentechnik⁷³⁷ und der statistischen Interpretation des Entropiebegriffs nach L.

M. MOZER / D.E. RUMELHART (Eds.): *Mathematical Perspectives on Neural Networks*. Lawrence Erlbaum, Mahwah/NJ. 1996. PP. 567-602 – K. HOLTHAUSEN: *Neuronale Netzwerke und Informationstheorie*. Dissertation. Universität Münster. 1995.

Zur Kritik des Informationsbegriffs s. z.B. P. RECHENBERG: *Zum Informationsbegriff der Informationstheorie*. Informatik Spektrum. Bd. 26. 2003. S. 320-26 – P. JANICH: *Was ist Information*. Suhrkamp Verl. Frankfurt am Main. 2006.

Zu den Anwendungen der Informationstheorie in der Neuro- und Kognitionswissenschaft s. z.B. Th.M. COVER / J.A. THOMAS: *Information Theory*. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 404-406 – Z. GHAHRAMANI: *Information Theory*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 551-55 – M. RAUTERBERG: *Über das Phänomen: „Information“*. In: B. BECKER (Hrsg.): *Zur Terminologie in der Kognitionsforschung*. Arbeitspapiere der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung Nr. 385. St. Augustin. 1989. S. 219-41.

Zu Anwendungen der Informationstheorie in der Psychologie s. z.B. W.R. GLASER: *Informationstheorie*. In: J. FUNKE / P.A. FRENCH: *Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Kognition*. Bd. 5. Hogrefe. Göttingen u.a. 2006. S. 744-46.

Zur Anwendungen der Informationstheorie und des Informationsbegriffs in der Philosophie und Wissenschaftstheorie s. z.B. D. MÜNCH: *Information*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 276-77 – Th. ZOGLAUER: *Can Information be Naturalized?* In: K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): *Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept*. Akademie Verl. Berlin. 1996. PP. 187-207 – Th. ZOGLAUER: *Der Informationsgehalt empirischer Modelle – zur Logik des semantischen Informationsbegriffs*. In: I. MAX / W. STELZNER (Hrsg.): *Logik und Mathematik. Frege-Kolloquium Jena 1993*. De Gruyter Verl. Berlin. 1995. S. 484-95 – E. OESER: *Der Informationsbegriff in der Philosophie und in der Wissenschaftstheorie*. In: O.G. FOLBERTH / Cl. HACKL (Hrsg.): *Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft*. Wissenschaftliches Symposium der IBM Deutschland GmbH 3.-5. Dezember 1984 in Bad Neuenahr. München, Wien. 1986. S. 231-56 – E. OESER: *Wissenschaft und Information. Systematische Grundlagen einer Theorie der Wissenschaftsentwicklung*. Bd. 1: *Wissenschaftstheorie und empirische Wissenschaftsforschung*. Bd. 2: *Erkenntnis als Informationsprozeß*. Bd. 3: *Struktur und Dynamik erfahrungswissenschaftlicher Systeme*. R. Oldenbourg Verlag. Wien, München. 1976.

Zum informationstheoretischen Ansatz eines neuen KOHONEN-Algorithmus anhand der subjektiven Information i.S.d. sog. „KERRIDGE-BONGARD Entropie“ s. K. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: *Self-Organized Feature Maps and Information Theory*. *Network: Computation in Neural Systems*. Vol. 8. 1997. PP. 215-27 und J. JOST / K. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: *On the Mathematical Foundations of a Theory of Neural Representation*. *Theory in Biosciences*. Vol. 116. 1997. PP. 125-39.

735 Zur Kritik des syntaktischen Aspekts des SHANNONschen Informationsbegriffs s. P. RECHENBERG: *Zum Informationsbegriff der Informationstheorie*. Informatik Spektrum. Bd. 26. 2003. S. 322.

Zur allgemeinen Kritik am Begriff der Information s. z.B. P. JANICH: *Was ist Information*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 2006.

736 S. Cl.E. SHANNON: *A Mathematical Theory of Communication*. *Bell System Technical Journal*. Vol. 27. No. 3. 1948. PP. 379-423 und PP. 623-56.

Einführend s. z.B. C.R. GALLISTEL / A.Ph. KING (Eds.): *Memory and the Computational Brain. Why Cognitive Science Will Transform Neuroscience*. Wiley-Blackwell. Chichester u.a. 2009. PP. 2-13 – L. FLORIDI: *Information. A Very Short Introduction*. Oxford University Press. 2010. PP. 37-45.

737 Die mathematische Quantifizierung des nachrichtentechnischen Informationsbegriffs gehen

BOLTZMANN in der Thermodynamik einen Zusammenhang herzustellen⁷³⁸, u.z. wie folgt⁷³⁹: Unter der Annahme des Gegebenseins einer experimentellen Alternative im Sinne eines binären Entscheidungsbaums erwartet man das Eintreten von k einander ausschließenden möglichen Ereignissen x_k im Fall einer Entscheidung der Alternative mit der Wahrscheinlichkeit p_k , wobei bei jedem Entscheidungsschritt die Wahrscheinlichkeit für jede der beiden Möglichkeiten $p = 0.5$ ist⁷⁴⁰, weshalb man für n Schritte $p = (0.5)^n = 2^{-n}$ erhält. Die „Einzelnformation“ I_k , die den „Neuigkeitswert“ des Ereignisses x_k messen soll, sofern eben bei der Entscheidung gerade x_k eintritt, ist dann definiert durch

$$I_k = -\log_2 p_k = n, \quad (36)$$

wobei \log_2 der Logarithmus zur Basis 2 ist. Bezogen auf einen Zeichensatz $X = \{x_i, i=1, \dots, m\}$ mit p_i als die dem Zeichen x_i zugeordnete Auftretenswahrscheinlichkeit erhält man den entsprechenden Informationsgehalt eines Zeichens x_i mit

$$I_i = -\log_2 p_i. \quad (37)$$

Sofern man sich nun für den mittleren Informationsgehalt einer Informationsquelle interessiert, d.h. für den Erwartungswert des Informationsgehalts, gelangt man zur sog. „Informationsentropie“ (engl. „information entropy“) H^741

dabei auf die frühen Arbeiten des U.S.-amerikanischen Elektroingenieurs Ralph V.L. HARTLEY: Transmission of Information. Bell System Technical Journal. Vol. 7. 1928. PP. 535-63 und des schwedisch-U.S.-amerikanischen Physikers Harry NYQUIST: Certain Factors Affecting Telegraph Speed. Bell System Technical Journal. Vol. 3. 1924. PP. 324-46 zurück.

Daneben leistete auch der U.S.-amerikanische Mathematiker und Kybernetiker Norbert WIENER: Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. MIT Press. Cambridge/MA. 1948 wesentliche Beiträge zur mathematisch-statistischen Informationstheorie. S. hierzu z.B. H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 12, 17-18 – D. ELSTNER: Information als Prozess. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 8. 2010. S. 310.

738 Siehe hierzu H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 23-27 mit Hinweis auf C.E. SHANNON: A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal. Vol. 27. No. 3. 1948. PP. 379-656 und L. BOLTZMANN: Vorlesungen über Gastheorie. Barth Verl. Leipzig. 1896.

739 Die folgenden Ausführungen sind v.a. ausgerichtet an: C.Fr. von WEIZSÄCKER: Aufbau der Physik. Deutscher Taschenbuch Verl. München. 1988. S. 165-68, 170-73 – C.Fr. von WEIZSÄCKER: Die Einheit der Natur. Studien. Deutscher Taschenbuch Verl. 1. Aufl. 1974. S. 346-52 – W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 34-39, 40-42.

S. auch Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MASS. 1997. PP. 101-13.

740 In der Informationstheorie wird eine binäre Entscheidung als ein Bit (Abkürzung für engl. „binary digit“) bezeichnet, das die Einheit des Informationsgehalts oder -werts mit $I_0 = \log_2 2$ bildet.

741 Eingehend s. z.B. E.Th. JAYNES: Probability Theory: The Logic of Science. 7th Ed. Cambridge University Press. Cambridge. 2010. PP. 343-71, v.a. PP. 346-51.

Einführend s. z.B. H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 26, 47 Fn. 3 – L. FLORIDI: Information. A Very Short Introduction. Oxford University Press. 2010. PP. 45-47 – K. MARTINÁS: Entropy and Information. In: W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11-15,

i.S. des U.S.-amerikanischen Mathematikers und Elektrotechnikers Claude E. SHANNON und des U.S.-amerikanischen Mathematikers Warren WEAVER⁷⁴², die als ein Maß für die mittlere Unsicherheit oder Unbestimmtheit der Vorhersage einer syntaktischen Information aufzufassen ist:

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \log p_i, \quad (38)$$

deren strukturelle Isomorphie zu L. BOLTZMANN's sog. „thermodynamischer Entropie“⁷⁴³ im Rahmen des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik

$$S = -k_B \sum_i w_i \ln w_i \quad (39)$$

offenkundig ist, wobei k_B die sog. „BOLTZMANN-Konstante“ ist, und w_i die Wahrscheinlichkeit eines thermodynamischen Systems beschreibt, einen bestimmten Mikrozustand einzunehmen.⁷⁴⁴

Wenn $p(x)$ die normierbare Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen Satz von m Ordnungsparametern $x = \{x_i, i=1, \dots, m\}$ darstellt, so wird die SHANNON-Entropie (H -Funktion) definiert durch

1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999. PP. 265-75.

S. hierzu auch D. APPLEBAUM: Probability and Information: An Integrated Approach. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1996. PP. 93-111, v.a. PP. 95-98 – H. HAKEN: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. PP. 48-53 – R. RIEDL: Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 48-56 – A. RAPOPORT: Allgemeine Systemtheorie. Wesentliche Begriffe und Anwendungen. Verlag Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988. S. 120-72, v.a. S. 121-25, 125-26. Cl. E. SHANNON hat dabei die Informationsentropie mit dem griechischen Buchstaben H ("Eta") belegt.

742 S. Cl.E. SHANNON / W. WEAVER: The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois. Urbana. (1949) 1963. PP. 14, 48-53, 53-57, v.a. P. 50 – Cl.E. SHANNON: A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal. Vol. 27. No. 3. 1948. PP. 379-423 und PP. 623-56.

743 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.10.

744 Dies führte, worauf H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 47-48 hinweist, L. BRILLOUIN: Science and Information Theory. Academic Press. London. 1962 dazu, die inhaltliche Gleichheit von Information und sog. „Negentropie“ (engl. "negentropy") zu postulieren, was jedoch C.Fr. von WEIZSÄCKER: Aufbau der Physik. Deutscher Taschenbuch Verl. München. 1988. S. 170-71 kritisiert, indem er von der Unterscheidung in aktuelle und potentielle Information ausgeht: „Man hat Information mit Wissen, Entropie mit Nichtwissen korreliert und folglich die Information als Negentropie bezeichnet. Dies ist aber eine begriffliche oder verbale Unklarheit. SHANNON's H ist auch dem Vorzeichen nach gleich der Entropie. H ist der Erwartungswert des Neuigkeitsgehalts eines noch nicht geschehenen Ereignisses, also ein Maß dessen, was ich wissen könnte, aber zur Zeit nicht weiß. H ist ein Maß potentiellen Wissens und insofern ein Maß einer definierten Art von Nichtwissen. Genau dies gilt auch von der thermodynamischen Entropie. Sie ist ein Maß der Anzahl der Mikrozustände im Makrozustand. Sie mißt also, wieviel derjenige, der den Makrozustand kennt, noch wissen könnte, wenn er auch den Mikrozustand kennenlernte. (...) Die Entropie (...) nennen wir die im Makrozustand enthaltene *potentielle Information*. Sie ist am größten für den thermodynamischen Gleichgewichtszustand. (...) In ihm ist die *aktuelle Information* über die Mikrozustände am kleinsten.“

$$H(x) = \langle -\ln p(x) \rangle = - \int p(x) \ln p(x) dx, \quad (40)$$

sodaß sich die Informationsentropie aus der mittleren Unbestimmtheit der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(x)$ ergibt.⁷⁴⁵

Für den Fall einer diskreten (Zustands-)Variable x wird die SHANNON-Entropie wie folgt definiert⁷⁴⁶:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i. \quad (41)$$

4.12 STRUKTURELLE „ANALOGIE“ ZUR HARMONIETHEORIE NACH P. SMOLENSKY

Diese strukturelle „Analogie“ zur Statistischen Physik besteht nach dem U.S.-amerikanischen Physiker Paul SMOLENSKY⁷⁴⁷ im Rahmen seines sog. „Kompetenztheorems“ (engl. “competence theorem”) auch für seine sog. „Harmonietheorie“ (engl. “harmony theory”)⁷⁴⁸, wenn man m.E., ausgehend von der Beziehung zwischen der Harmoniefunktion und der Wahrscheinlichkeitstheorie $p \propto e^{H/T}$ ⁷⁴⁹, zu folgenden Formeln gelangt⁷⁵⁰:

$$H \propto T \ln p \text{ bzw. } H \propto T \sum_{i=1}^I p_i \ln p_i, \quad (42)$$

wobei T die sog. „komputationale Temperatur“ (engl. “computational temperature”)⁷⁵¹ ist, und die Harmonie H damit – in Anlehnung an den Physiker

745 S. C.I.E. SHANNON / W. WEAVER: The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois. Urbana. (1949) 1963. PP. 87-91, v.a. P. 87.

Einführend s. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 36 – B. POMPE: Einführung in die Informationstheorie. Vorlesungsmanuskript. 1-semesterige Vorlesung für Studenten der Physik. Institut für Physik. Universität Greifswald. 2005. S. 46.

Siehe auch die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.1.

746 S. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 36.

747 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 226-30, v.a. 229-30 bezeichnet dies als “The ‘Physics Analogy’” und schreibt: “In harmony theory, the concept of self-consistency plays the leading role. The theory extends the relationship that Shannon exploited between information and physical entropy: Computational self-consistency is related to physical energy, and computational randomness to physical temperature. The centrality of the consistency or harmony function mirrors that of the energy or Hamiltonian function in statistical physics. Insights from statistical physics, adapted to the cognitive systems of harmony theory, can be exploited to relate the micro- and macrolevel accounts of the computation. Theoretical concepts, theorems, and computational techniques are being pursued, towards the ultimate goal of a subsymbolic formulation of the theory of information processing.”

748 Siehe die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.

749 Siehe die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.3.

750 Diese Formeln finden sich in dieser Form nicht bei P. SMOLENSKY.

751 S. z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. 1988. P. 19: “There is a system parameter called the *computational temperature* that governs the degree of randomness in the units' behavior, it goes to zero as the computation

und Philosophen Carl Friedrich von WEIZSÄCKER⁷⁵² – die aktuelle (Struktur-)Information der subsymbolischen Mikrozustände I im Rahmen des sog. "Parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling"⁷⁵³ bezeichnet, die (bereits) gewußt wird (sog. „Negentropie“ (engl. "negentropy")⁷⁵⁴)⁷⁵⁵, m.a.W. ist die Harmonie H als ein Maß für die mittlere Sicherheit oder Bestimmtheit der Vorhersage einer subsymbolischen Information, z.B. im Rahmen einer Ergänzungsaufgabe⁷⁵⁶, aufzufassen, u.z. der Information, die gemäß dem Harmoniemaximierungstheorem⁷⁵⁷ die Randbedingungen am besten erfüllt, bzw. als ein Maß der Anzahl der bestehenden subsymbolischen Mikrozustände mit maximaler Selbstkonsistenz im symbolischen Makrozustand.

4.13 INFORMATIONSTHEORETISCHE ANALYSEN VON NEURONALEN POPULATIONEN

Die Informationsentropie H i.S. Cl.E. SHANNON's kann nun dazu verwendet werden, um den (maximalen) Grad des Informationstransfers (engl. "information transfer") in einer neuronalen Population anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung(-sfunktion) (engl. "probability distribution (function)") zu berechnen⁷⁵⁸: Angenommen, daß ein Stimulus s_i einer Menge S mit einer be-

proceeds. (The process is *simulated annealing*, like in the Boltzmann machine (...))."

S. hierzu auch M. KÖHLE: *Neurale Netze*. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 70-72.

752 S. Fn. 744.

753 Siehe die Ausführungen in Kpt. 4.22.

754 Anstatt des Begriffs der sog. „Negentropie“ (engl. "negentropy") bzw. „negativen Entropie“ sollte eher der Begriff der sog. „freien Energie“ (engl. "free energy") verwendet werden, worauf bereits E. SCHRÖDINGER: *Was ist Leben?* 3. Aufl. Piper. München. 1989. S. 106-108, v.a. S. 106 hinweist.

S. hierzu auch Fn. 746.

Zum Begriff der sog. „freien Energie“ (engl. "free energy") siehe die Ausführungen in Kpt. 4.3.03. Einführend s. z.B. K. MARTINÁS: *Entropy and Information*. In: W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): *The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science*. Vienna, Austria, June 11-15, 1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999. PP. 265-75, v.a. PP. 269-70.

S. auch R. RIEDL: *Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution*. Piper. München, Zürich. (1975) 1990. S. 28-30, 48-56 – R. RIEDL: *Schrödinger's Negentropy Concept and Biology*. In: J. GÖTSCHL (Ed.): *Erwin Schrödinger's World View. The Dynamics of Knowledge and Reality*. Kluwer. Dordrecht u.a. 1992. PP. 59-69 – A. RAPOPORT: *Allgemeine Systemtheorie. Wesentliche Begriffe und Anwendungen*. Verlag Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988. S. 133-34.

755 Ersichtlich am positiven Vorzeichen der Harmoniefunktion.

756 Siehe die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.3.

757 Siehe die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.232 und 5.1.01.233.

758 S. einführend z.B. A. BORST / Fr.E. THEUNISSEN: *Information Theory and Neural Coding*. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 947-57, v.a. PP. 948-50 – R. QUIAN QUIROGA / S. PANZERI: *Extracting Information from Neural Populations: Information Theory and Decoding Approaches*. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 10. 2009. PP. 173-85, v.a. PP. 175-76 bezogen auf den Dekodierungsprozeß.

S. eingehend auch Fr. RIEKE / D. WARLAND / R. de RUYTER VAN STEVENINCK / W. BIALEK: *Spikes: Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge/MASS. 1997. PP. 101-87.

S. einführend z.B. R. BADDELEY: *Introductory Information Theory and the Brain*. In: R. BADDELEY / P. HANCOCK / P. FÖLDIÁK: *Information Theory and the Brain*. University Press. Cambridge/MA. PP. 1-20.

S. auch die Ausführungen in Kpt. 3.21.

stimmten Wahrscheinlichkeit $p(s_i)$ gegeben ist, dann ist die (Informations-)Entropie $H(S)$ der Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(s_i)$ für jeden Stimulus s_i definiert gemäß⁷⁵⁹

$$H(x) = - \sum_i p(s_i) \log_2 p(s_i). \quad (43)$$

Demgemäß, unter der Hinzuziehung des sog. „BAYES⁷⁶⁰ Theorems“ (engl. „BAYES' theorem“)⁷⁶¹, mißt – im Rahmen des Enkodierungsprozesses⁷⁶² – die bedingte (Informations-)Entropie $H(R|S)$, gemäß⁷⁶³

$$H(R|S) = - \sum_j p(s_j) \sum_i p(r_i|s_j) \log_2 p(r_i|s_j), \quad (44)$$

die mittlere Unsicherheit oder Unbestimmtheit des Informationstransfers, die in einer neuronalen (Populations-)Aktivität (sog. „neural response“) r_i verbleibt, falls die Stimulusbedingungen (engl. „stimulus conditions“) s_j bekannt sind, so daß damit z.B. die selektive Differenzierung von neuronalen Populationen bestimmt werden kann (sog. „Theory of Neural Group Selection“⁷⁶⁴ nach G.M.

759 S. z.B. A. BORST / Fr.E. THEUNISSEN: Information Theory and Neural Coding. Nature Neuroscience. Vol. 2. 1999. P. 949 – R. QUIAN QUIROGA / S. PANZERI: Extracting Information from Neural Populations: Information Theory and Decoding Approaches. Nature Reviews Neuroscience. Vol. 10. 2009. P. 175.

760 Benannt nach dem englischen Mathematiker Reverend Thomas Bayes.

761 Unter dem sog. „BAYES' Theorem“ (engl. „BAYES' theorem“) versteht man, allgemein, die bedingte Wahrscheinlichkeit als die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses unter der Bedingung, daß ein anderes Ereignis bereits eingetreten ist, d.h., in Bezug auf den Informationstransfer (engl. „information transfer“) in einer neuronalen Population, die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(r_i|s_j)$ als die Wahrscheinlichkeit der neuronalen Aktivität r_i unter der Voraussetzung, daß die Stimulusbedingungen (engl. „stimulus conditions“) s_j bekannt sind, und ist definiert mit:

$$p(r_i|s_j) = \frac{p(s_j|r_i) \cdot p(r_i)}{p(s_j)}. \quad (45)$$

S. hierzu z.B. J. BORTZ: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 57-59 – C.R. GALLISTEL / A.Ph. KING (Eds.): Memory and the Computational Brain. Why Cognitive Science Will Transform Neuroscience. Wiley-Blackwell. Chichester u.a. 2009. PP. 27-42, v.a. PP. 30-32.

762 S. hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.21.

763 S. z.B. A. BORST / Fr.E. THEUNISSEN: Information Theory and Neural Coding. Nature Neuroscience. Vol. 2. 1999. P. 949.

764 S. z.B. eingehend G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987. PP. 4-8, v.a. P. 5, PP. 43-69, v.a. P. 45, PP. 64-65 – O. SPORNS: Selectionist and Instructionist Ideas in Neuroscience. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 4-26.

S. auch O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994.

S. einführend z.B. G.M. EDELMAN / G. TONONI: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 107-53.

S. auch C. SIEBERT: Qualia. Das Phänomenale als Problem philosophischer und empirischer Bewußtseinstheorien. Dissertation. Philosophische Fakultät. Humboldt-Universität zu Berlin. 1998. S. 93-97.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.3.01.

EDELMAN, O. SPORNS und G. TONONI).

4.14 GENERELLE UNIFIZIERTE INFORMATIONSTHEORIE

In dem Bestreben eine allgemeingültige Definition der Information vorzunehmen, und somit das von P. FLEISSNER und W. HOFKIRCHNER⁷⁶⁵ so bezeichnete sog. „CAPPURRO'sche Trilemma“⁷⁶⁶ zu überwinden, ist nun der Versuch unternommen worden eine umfassende Einheitswissenschaft der Information (engl. „Unified Information Theory (UIT)“⁷⁶⁷) zu begründen⁷⁶⁸: Anknüpfend auf die Position Klaus FUCHS-KITTOWSKI's⁷⁶⁹ vertreten der österreichische Informatiker

765 S. P. FLEISSNER / W. HOFKIRCHNER: Informatio Revisited: Wider den dinglichen Informationsbegriff. Informatik Forum. Vol. 8. 1995. S. 126-31, v.a. S. 126-27.

766 S. z.B. R. CAPURRO: Das Capurrosche Trilemma. Ethik und Sozialwissenschaften. Vol. 9. 1998. PP. 188-89.

Einen Überblick bietet z.B. D. ELSTNER: Information als Prozess. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 8. 2010. S. 310-50, v.a. S. 313-14.

767 Grundlegend s. z.B. Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER: Ein einheitlicher Informationsbegriff für eine einheitliche Informationswissenschaft. In: Chr. FLOYD / Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER (Eds.): Stufen zur Informationsgesellschaft. Festschrift zum 65. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski. Peter Lang. Frankfurt u.a. 2002. S. 242-81 – W. HOFKIRCHNER: How to Achieve a Unified Theory of Information. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 7. 2009. PP. 357-68 – N. FENZL / P. FLEISSNER / W. HOFKIRCHNER / R. JAHN / G. STOCKINGER: On the Genesis of Information Structures: A View that is neither Reductionist nor Holistic. In: K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verl. Berlin. 1996. P. 274 – N. FENZL: Some Considerations about Interaction and Exchange of Information between Open and Self-Organizing Systems. In: W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11-15, 1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999. PP. 189-95 – Fr. SCHWEITZER: Structural and Functional Information – An Evolutionary Approach to Pragmatic Information. In: W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11-15, 1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999. PP. 315-30 – Kl. FUCHS-KITTOWSKI: Information – Neither Matter nor Mind: On the Essence and on the Evolutionary Stage Conception of Information. In: W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11-15, 1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999. PP. 331-50.

Siehe auch W. HOFKIRCHNER (Ed.): The Quest for a Unified Theory of Information. Overseas Publ. Amsterdam. 1999 – W. HOFKIRCHNER / P. FLEISSNER (Eds.): The Quest of a Unified Theory of Information. Proceedings of the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11-15, 1996. Gordon and Breach Publishers. Amsterdam. 1999.

768 Einen Überblick bietet z.B. D. ELSTNER: Information als Prozess. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 8. 2010. S. 310-50, v.a. S. 317-22.

769 S. z.B. K. FUCHS-KITTOWSKI: Information, Organisation, Evolution. In: B. WENZLAFF / K. FUCHS-KITTOWSKI (Eds.): IV. Wissenschaftliches Kolloquium zur Organisation der Informationsverarbeitung. Berlin 13.12.-15.12.1983. Information, Organisation und Informationstechnologie. 1983. S. 76 – K. FUCHS-KITTOWSKI / H.A. ROSENTHAL: Selbstorganisation, Information und Evolution: Zur Kreativität der belebten Natur. In: N. FENZL / W. HOFKIRCHNER / G. STOCKINGER (Eds.): Information und Selbstorganisation: Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information. Studien-Verlag. Innsbruck. 1998. S. 141-88 – K. FUCHS-KITTOWSKI / L. HEINRICH / A. ROLF: Information entsteht in Organisationen: in kreativen Unternehmen. Wissenschaftstheoretische und methodologische Konsequenzen für die Wirtschaftsinformatik. In: J. BECKER et al. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik und Wissenschaftstheorie: Bestandsaufnahme und Perspektiven. Betriebswirtschaftlicher Verlag. Wies-

Christian FUCHS⁷⁷⁰ und der österreichische Politologe und Psychologe Wolfgang HOFKIRCHNER⁷⁷¹ ein evolutionäres (Hierarchie-)Modell der Information, bestehend aus dissipativen, autopoietischen und sozialen (Informations-)Systemen, in denen Information als ein Resultat von Selbstorganisationsprozessen betrachtet wird, wobei sich Syntax, Semantik und Pragmatik der Informationsprozesse i.S. der Dialektik entwickeln.

baden. 1999. S. 330-61.

770 S. z.B. Chr. FUCHS: Towards a Critical Theory of Information. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 7. 2009. PP. 243-92. From: <http://www.triple-c.at> – Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER: Ein einheitlicher Informationsbegriff für eine einheitliche Informationswissenschaft. In: Chr. FLOYD / Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER (Eds.): Stufen zur Informationsgesellschaft. Festschrift zum 65. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski. Peter Lang. Frankfurt u.a. 2002. S. 242-81.

771 S. z.B. W. HOFKIRCHNER: How to Achieve a Unified Theory of Information. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 7. 2009. PP. 357-68 – Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER: Ein einheitlicher Informationsbegriff für eine einheitliche Informationswissenschaft. In: Chr. FLOYD / Chr. FUCHS / W. HOFKIRCHNER (Eds.): Stufen zur Informationsgesellschaft. Festschrift zum 65. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski. Peter Lang. Frankfurt u.a. 2002. S. 242-281 – W. HOFKIRCHNER: Information und Selbstorganisation – zwei Seiten einer Medaille. In: N. FENZL / W. HOFKIRCHNER / G. STOCKINGER (Eds.): Information und Selbstorganisation: Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information. Studien-Verlag. Innsbruck. 1998. S. 69-99 – P. FLEISSNER / W. HOFKIRCHNER: Informatio Revisited: Wider den dinglichen Informationsbegriff. Informatik Forum. Vol. 8. 1995. PP. 127-31.

4.2 METHODEN UND METHODISCHE PRINZIPIEN EINER NEUROKOGNITIVEN INFORMATIONSTHEORIE IM KONNEKTIONISMUS

Im vorliegenden Kapitel werden im Folgenden die im Konnektionismus verwendeten Methoden und methodischen Prinzipien zur Analyse der zumeist in vektorieller Form vorliegenden Daten bzw. Informationen vorgestellt⁷⁷², wie sie in den später behandelten theoretischen (Neuro-)Architekturen (Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.15) im Rahmen von integrativen (Synchronisations-)Mechanismen sowie von Klassifikations-, Optimierungs- und Lernproblemen angewendet werden.

⁷⁷² Eine sehr gute Einführung hierzu bietet z.B. M. POSPESCHILL: Konnektionismus und Kognition. Eine Einführung. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2004.

4.21 MULTIVARIA(N)TE CLUSTER ANALYSIS⁷⁷³

4.210 Die sog. „(multivaria(n)te) Clusteranalyse“ (engl. “Multivaria(n)te Cluster Analysis (MCA)”) ⁷⁷⁴ stellt allgemein ein heuristisches Verfahren zur systematischen Klassifikation der Objekte einer gegebenen Objektmenge anhand der (Un-)Ähnlichkeit ihrer Merkmalsausprägungen dar⁷⁷⁵, hier: einer Menge von Datenvektoren, die als multivariat verteilte Zufallsvariablen aufgefaßt werden

773 Das Kapitel 4.211 ist eine zum großen Teil übernommene Fassung des Kapitels 6.30 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009.

774 Zur sog. „multivaria(n)ten Clusteranalyse“ in der Statistik s. z.B. Br. EVERITT / S. LANDAU / M. LEESE: Cluster Analysis. 4th Ed. Edward Arnold. London. 2001 – J. BACHER / A. PÖGE / Kn. WENZIG: Clusteranalyse. Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München. 2010 – P.A. GORE, Jr.: Cluster Analysis. In: H.E.A. TINSLEY / St.D. BROWN: Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. Academic Press. San Diego u.a. 2000. PP. 297-321 – H. KAUFMANN / H. PAPE: Clusteranalyse. In: L. FAHRMEIR / A. HAMERLE / G. TUTZ (Hrsg.): Multivariate statistische Verfahren. 2. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1996. S. 437-536 – J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. PP. 505-64 – Kl. BACKHAUS / B. ERICHSON / R. WEIBER: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 12. Aufl. Springer-Verl. Berlin, Heidelberg. 2008. S. 389-449 – J. BORTZ: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 547-66 – G. MARINELL: Multivariate Verfahren. 4. Aufl. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 1995. S. 70-92 – H.P. LITZ: Multivariate Statistische Methoden und ihre Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 384-426 – H. RINNE: Statistische Analyse multivariater Daten. Einführung. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 165-85 – S. BRACHOLDT: Bewertung von Clusterverfahren. Diplomarbeit. Fachbereich Informatik. Hochschule Mittweida. 2009.

Zur sog. „multivaria(n)ten Clusteranalyse“ in der Neuroinformatik und im Konnektionismus s. z.B. R. BRAUSE: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik. B.G. Teubner. Stuttgart. 1995. S. 249 – A. CLARK: Connectionism, Competence, and Explanation. In: M.A. BODEN: The Philosophy of Artificial Intelligence. Oxford. 1990. PP. 301-304 – A. CLARK: Mindware. An Introduction to the Philosophy of Cognitive Science. Oxford Univ. Press. New York, Oxford. 2001. PP. 69-70 – S. BRACHOLDT: Bewertung von Clusterverfahren. Diplomarbeit. Fachbereich Informatik. Hochschule Mittweida. 2009. S. 15-16.

Zur geometrischen Interpretation der multivaria(n)ten Clusteranalyse s. z.B. J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. P. 531.

775 Die Menge der zu klassifizierenden Objekte bezeichnet man mit $I = \{I_1, \dots, I_N\}$, die Ausgangsdaten für eine Clusteranalyse bilden dabei i.d.R. die Merkmalswerte von p an den Objekten gemessenen Merkmalen $\mathbf{x}' = (x_1, \dots, x_p)$, wobei die Merkmalsausprägungen z.B. reelle Zahlen sein können, und die dadurch erhaltenen Merkmalswerte in einer $N \times p$ Datenmatrix zusammengefaßt werden:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}'_1 \\ \dots \\ \mathbf{x}'_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & \dots & x_{Np} \end{pmatrix}. \quad (46)$$

Die meisten Verfahren bilden dabei die Klassen derart, daß jedes Objekt genau einer von g Klassen C_1, \dots, C_g angehört, sodaß man bei einer solchen Klasseneinteilung von einer sog. „Partition“ \mathcal{C} spricht.

S. hierzu z.B. H. KAUFMANN / H. PAPE: Clusteranalyse. In: L. FAHRMEIR / A. HAMERLE / G. TUTZ (Hrsg.): Multivariate statistische Verfahren. 2. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1996. S.

und in Form von Vektoren⁷⁷⁶ in einem multi- oder n -dimensionalen Vektorraum nach Maßgabe ihrer (Un-)Ähnlichkeit zu einer häufig noch unbekanntem Anzahl von homogenen Gruppen, die als sog. „Cluster“⁷⁷⁷ bezeichnet werden, zusammengefaßt werden, d.h. als eine Gruppe von Vektoren, die untereinander oder in Bezug auf einen berechneten Schwerpunkt eine minimale Distanz i.S. einer Distanzmetrik (s. Graphik.23), z.B. der sog. „EUKLIDischen Distanz“ (engl. “Euclidean distance”)⁷⁷⁸, aufweisen, die – allgemein – wie folgt definiert ist (s. Graphik.22):

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}. \quad (47)$$

Entscheidend für das Ergebnis einer Clusteranalyse ist demnach die Wahl eines Proximitätsmaßes, d.h. eines statistischen (Un-)Ähnlichkeitsmaßes, z.B. i.S. einer Distanzmetrik, und die Wahl von Gruppierungsverfahren in Form von (Fusionierungs- und Partitionierungs-)Algorithmen⁷⁷⁹, mit denen man eine optima-

438-39.

776 Zur Definition eines Vektors s. einfürend z.B. H. FISCHER / H. KAUL: *Mathematik für Physiker 1: Grundkurs*. 3. Aufl. Teubner, Wiesbaden. 1997. S. 98-106 – W. NOLTING: *Grundkurs Theoretische Physik 1. Klassische Mechanik*. 8. Aufl. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2006. S. 3-5.

Mit Bezug auf den Konnektionismus s. z.B. M.I. JORDAN: *An Introduction to Linear Algebra in Parallel Distributed Processing*. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 365-422, v.a. PP. 365-66 – P. SMOLENSKY: *Neural and Conceptual Interpretations of Parallel Distributed Processing Models*. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 390-431, v.a. PP. 403-11.

777 In der Neuroinformatik spricht man von einem sog. „Cluster“ (dt. „Gruppe“, „Haufen“, „Ballung“) im Rahmen einer sog. „(multivaria(n)ten) Clusteranalyse“, d.h. die Ermittlung von Ballungen oder Anhäufungen von verteilten Vektoren als Punkte bzw. Punktwolken in einem multidimensionalen Vektorraum, wobei der Abstand der Punkte zueinander innerhalb eines Clusters geringer ist als der Abstand zu Punkten anderer Cluster.

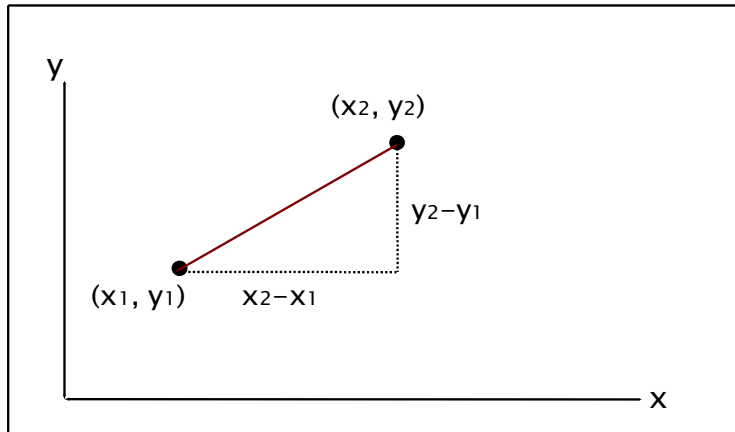
Siehe hierzu z.B. R. BRAUSE: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik*. B.G. Teubner, Stuttgart. 1995. S. 249 – A. CLARK: *Connectionism, Competence, and Explanation*. In: M.A. BODEN: *The Philosophy of Artificial Intelligence*. Oxford. 1990. PP. 301-304 – Fr. CALVO GARZÓN: *Connectionist Semantics and the Collateral Information Challenge*. *Mind & Language*. Vol. 18. 2003. PP. 79-80 – N. SHEA: *Content and its Vehicles in Connectionist Systems*. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 246-69, v.a. PP. 250-54.

778 Zum Begriff der sog. „EUKLIDischen Distanz“ (engl. “Euclidean distance”) s. z.B. S. HAYKIN: *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 26-27 – M. KAVOURAS / M. KOKLA: *Theories of Geographic Concepts: Ontological Approaches to Semantic Integration*. CRC Press. Boca Raton/FL. 2007. PP. 183-89, v.a. P. 184. Ein weiteres weit verbreitetes Distanzmaß bei einer metrischen Variablenstruktur bildet die sog. „MINKOWSKI-Metrik“ (engl. “MINKOWSKI metric”).

S. hierzu z.B. Kl. BACKHAUS / B. ERICHSON / R. WEIBER: *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 12. Aufl. Springer-Verl. Berlin, Heidelberg. 2008. S. 404-405.

779 Zu den hierarchischen Gruppierungsverfahren zählen z.B. “WARD-Method”, “Single-Linkage-Method” und “Complete-Linkage-Method”. S. hierzu J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: *Multivariate Data Analysis. A Global Perspective*. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. PP. 530-32 – Kl. BACKHAUS / B. ERICHSON / R. WEIBER: *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 12. Aufl. Springer-Verl. Berlin, Heidelberg. 2008. S.

le Separierung bzw. Fusionierung der Cluster erreichen will. Indem man nun mehrere, benachbarte Cluster zu einem neuen übergeordneten Cluster zusammenfaßt, ergibt sich eine Clusterhierarchie, deren Baumstruktur in der Re-



$$d(x_i, x_j) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2} \quad (48)$$

Graphik.22: Geometrische Interpretation des Konzepts der sog. „EUKLIDischen Distanz“ (engl. „EUCLIDEan distance“): Angenommen, daß zwei 2-dimensionale Punkte in einem Koordinatensystem mit den Koordinaten (x_1, y_1) bzw. (x_2, y_2) gegeben sind. Die EUKLIDische Distanz besteht dann zwischen diesen beiden Punkten in der Länge der Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks, und wird berechnet anhand der Formel unter der Abbildung gemäß dem Pythagoreischen Theorem (J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. P. 523).

gel in einem sog. „Dendrogramm“ (engl. „dendrogram“)⁷⁸⁰ dargestellt wird (s. Graphik.24). Eine multivaria(n)te Verteilung liegt vor, wenn es sich um eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung von mehreren statistischen Variablen handelt, die zueinander in Korrelation gebracht werden müssen.

4.211 Mit dem U.S.-amerikanischen Philosophen und Wissenschaftstheoretiker William BECHTEL⁷⁸¹ kann die holistische Analyse der Clusteranalyse⁷⁸² zwar die

416-24 – J. BORTZ: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 557-60.

780 Unter einem sog. „Dendrogramm“ (engl. „dendrogram“) (s. Graphik.24) versteht man dabei eine graphische Repräsentation eines Klassifikationsprozesses im Rahmen der sog. „(multivaria(n)-ten) Clusteranalyse“ (engl. „Multivaria(n)te Cluster Analysis (MCA)“ in Gestalt eines Baumgraphen (engl. „tree graph“), der die hierarchische Struktur der einzelnen Cluster zueinander dadurch illustriert, daß die Clusterobjekte stufenweise miteinander in einer hierarchischen Prozedur kombiniert werden, u.z. nach Maßgabe ihrer Distanzrelationen.

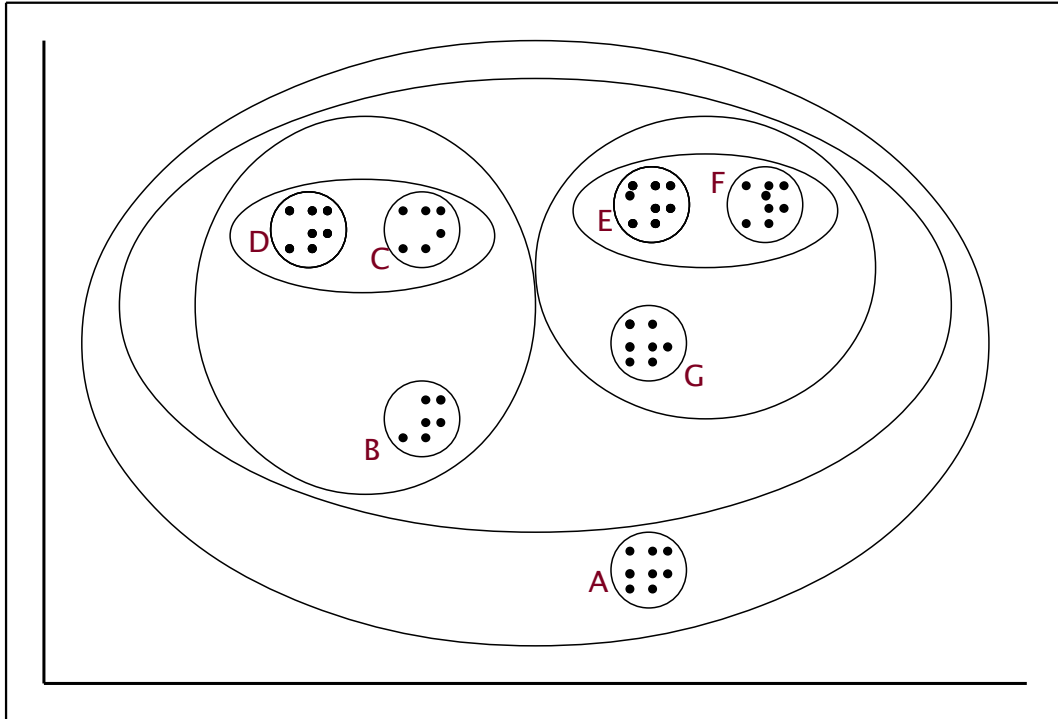
S. hierzu z. B. J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. PP. 506, 530, 549 – J.

BORTZ: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 559.

781 S. W. BECHTEL: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. PP. 206-208.

782 S. W. BECHTEL: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. P. 207: „(...) a cluster analysis [, a more holistic analysis,] may reveal that similar patterns of activation are generated by common features in the input. This is interpreted as showing that the network has differentiated inputs with those features from inputs with different features. This suggests that connectionist systems can

strukturierte Klassifikation der Dateneigenschaften und -beziehungen aufdecken, sodaß man – unter Verwendung von realen sensorischen Daten – ein



Graphik.23: Schematisches Diagramm einer Clusterhierarchie (in Anlehnung an J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: *Multivariate Data Analysis. A Global Perspective*. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. PP. 511-12).

konnektionistisches System als eine „Verkörperung“ (engl. „embodiment“)⁷⁸³ der sog. „Repräsentationalen Theorie des Geistes“ (engl. „Representational Theory of Mind (RThM)“) i.S. J.A. FODOR's⁷⁸⁴ auffassen könne, jedoch nehmen die in diesem schwachen Sinn „intentionalen Repräsentationen“ eines konnektionistischen Systems eben nicht die Form von Propositionen und propositionellen Einstellungen (engl. „propositional attitudes“)⁷⁸⁵ i.S. der Alltagspsychologie (engl. „folk psychology“) an. Allerdings könnte man m.E. mit W. BECHTEL⁷⁸⁶ – unter Berufung auf W.G. LYCAN⁷⁸⁷ und D.Cl. DENNETT⁷⁸⁸ – annehmen,

indeed be understood as embodying the representational theory of mind: each layer of units in a network generates a different representation of the input information until the output pattern is produced.”

783 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 6.5.

784 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.145, Fn. 281.

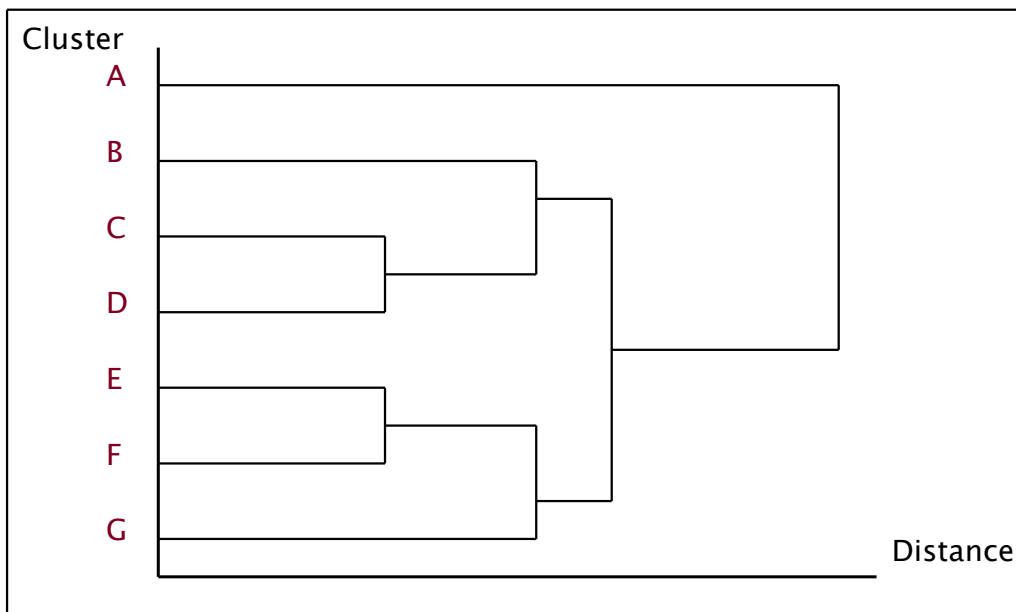
785 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.145, Fn. 280, 284.

786 S. W. BECHTEL: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): *A Companion to the Philosophy of Mind*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. P. 207-208 mit Hinweis auf W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Future of Folk Psychology. In: R. BURTON (Ed.): *Minds: Natural and Artificial*. SUNY University Press. Albany/NY. 1993. PP. 69-100.

787 S. W.G. LYCAN: Homuncular Functionalism Meets PDP. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): *Philosophy and Connectionist Theory*. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 259-86.

788 S. D.Cl. DENNETT: *Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology*. MIT Press. Cam-

daß mentale Repräsentationen und Prozesse sowie propositionale Einstellungen auf den „internen subpersonalen Operationen“ (engl. “internal subpersonal operations”) supervenieren (engl. “supervene”), sodaß – im Gegensatz zu den eliminativistischen Positionen W. RAMSEY's, S.P. STICH's und J. GARON's⁷⁸⁹ sowie P.M. CHURCHLAND's⁷⁹⁰ – das Konnektionistische Paradigma, z.B. in Form der Subsymbolischen Position P. SMOLENSKY's, durchaus mit der Verwendung des intentionalen Sprachgebrauchs i.S. der Alltagspsychologie vereinbar wäre.



Graphik.24: Schematisches Diagramm eines Dendrogramms (in Anlehnung an J.F. HAIR / W. BLACK / B. BABIN / R. ANDERSON / R. TATHAM: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010. PP. 511-12).

bridge/MA. 1978.

789 S. W. RAMSEY / St. STICH / J. GARON: Connectionism, Eliminativism and the Future of Folk Psychology. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 199-228.

790 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press / Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. PP. 1-22, 125-27. Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 6.14.01, 6.2.01, 6.421.01 und 6.526.05.

4.22 PARALLEL (SOFT) CONSTRAINT SATISFACTION MODELING⁷⁹¹

4.220 Im Gegensatz zu den traditionellen systematischen mathematischen Methoden⁷⁹² in Bezug auf das sog. "Constraint⁷⁹³ Satisfaction Problem (CSP)" (dt. „Bedingungserfüllungsproblem“) ⁷⁹⁴ in der Künstlichen Intelligenz⁷⁹⁵, die eine konsistente⁷⁹⁶ Wertzuweisung an die Variablen eines Constraint-Netzes (engl. "constraint network")⁷⁹⁷ garantieren, verwendet man im Konnektionismus vorwiegend stochastische Techniken im Rahmen von Optimierungsproblemen

791 Dieses Kapitel ist eine teilweise überarbeitete Fassung des Kapitels 5.621 in meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009.

792 Z.B. in der Logikprogrammierung.

S. hierzu z.B. R. DECHTER / Fr. ROSSI: Constraint Satisfaction. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 798.

793 Zur exakten Definition des Begriffs des sog. "Constraint" s. z.B. Chr. LECOUTRE: Constraint Networks. Techniques and Algorithms. ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc. London, Hoboken/NJ. 2009. P. 42.

794 Unter einem sog. "Constraint Satisfaction Problem (CSP)", bestehend aus einer Menge von (Neben- oder Rand-)Bedingungen für eine Menge von Variablen mit ihren Wertebereichen, versteht man die Aufgabe, Kombinationen von Zuweisungen von Werten an die Variablen zu finden, die sämtliche Bedingungen i.S. von Relationen, definiert über Untermengen von Variablen, erfüllen, wozu eine Vielzahl von (systematischen) Algorithmen entworfen worden sind.

S. hierzu z.B. R. DECHTER / Fr. ROSSI: Constraint Satisfaction. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 793-94 – H.W. GUESGEN: Constraints. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 267-68 – H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 97-109 – U. SCHMID / M.Chr. KINDSMÜLLER: Kognitive Modellierung. Eine Einführung in die logischen und algorithmischen Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 170-74.

795 S. z.B. R. DECHTER: Constraint Satisfaction. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 195-97 – T. REGIER: Computational Models of Cognition: Constraining. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 611-15 – R. DECHTER / Fr. ROSSI: Constraint Satisfaction. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 793-800 – H.W. GUESGEN: Constraints. In: G. GÖRZ et. al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 267-87 – H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 97-109.

S. auch P. SMITH CHURCHLAND / T.J. SEJNOWSKI: The Computational Brain. MIT Press. Cambridge/MA. 1992. PP. 82-96.

796 S. Fn. 8.

797 Grundlegend s. z.B. Chr. LECOUTRE: Constraint Networks. Techniques and Algorithms. ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc. London, Hoboken/NJ. 2009.

Zur exakten Definition des Begriffs des sog. "Constraint Network" s. z.B. Chr. LECOUTRE: Constraint Networks. Techniques and Algorithms. ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc. London, Hoboken/NJ. P. 51.

(engl. "problems of constraint optimization"⁷⁹⁸), z.B. anhand des sog. „HOPFIELD⁷⁹⁹-Netzes“ (engl. "HOPFIELD Network")⁸⁰⁰ oder anhand der sog. „BOLTZMANN⁸⁰¹-Maschine“ (engl. "BOLTZMANN machine")⁸⁰² mit ihrem dem sog. "Simulated Annealing"⁸⁰³ angeglichenen Lernverfahren, die mit Kohärenz- statt Konsistenzstandards⁸⁰⁴ arbeiten, wobei die positiven und negativen Relationen zwischen den Variablen anhand von (nicht-linearen) exzitatorischen und

798 S. z.B. R. DECHTER / Fr. ROSSI: Constraint Satisfaction. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 797 – H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 97-109.

799 Benannt nach dem U.S.-amerikanischen Physiker John Hopfield, der es im Jahr 1982 entwickelt hat.

S. hierzu Fn. 10.

800 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 2.25.03, Fn. 125.

801 Benannt nach dem österreichischen Physiker und Philosophen Ludwig BOLTZMANN.

802 S. z.B. G.E. HINTON / T.J. SEJNOWSKI: Learning and Relearning in Boltzmann Machines. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 282-317 – G.E. HINTON: Connectionist Learning Procedures. Artificial Intelligence. Vol. 40. 1989. PP. 213-14.

S. hierzu auch H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 101-108 – H.W. GUESGEN: Constraints. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 268 – G.W. COTTRELL: Attractor Networks. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 257-58.

Zum rekurrenten Netzwerkmodell der sog. „BOLTZMANN-Maschine“ s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 207-15, v.a. S. 207-208: Um das Problem der sog. „HOPFIELD-Netze“ zu lösen, die „sich häufig in einem lokalen Minimum statt im angestrebten globalen Minimum stabilisieren“, verwendet die BOLTZMANN-Maschine „statistische Methoden, bei denen die Neuronen ihren Zustand (...) zufällig nach einer Wahrscheinlichkeitsverteilung ändern.“

S. auch B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 144-50.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.12, Fn. 22.

803 S. z.B. H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 98-100.

804 Unter dem Begriff der (logischen) sog. „Konsistenz“ (engl. "consistence") versteht man in der Mathematik und der (mathematischen) Logik die Eigenschaft eines Axiomensystems, z.B. eines Logikkalküls, wenn es nachweislich keine Widersprüche enthält (sog. „Widerspruchsfreiheit“ (engl. "consistency")), wohingegen der Begriff der (stochastischen) sog. „Konsistenz“ (engl. "consistence") im Rahmen der Theorie der künstlichen neuronalen Netze, die keine „harten“ Widersprüche kennt, m.E. wohl eher im Sinne der „weichen“ Erfüllung von (möglichst vielen) Randbedingungen zu verstehen ist, m.a.W. wenn eine Wertezuweisung an die Variablen, die den Neuronen(-vektoren) entsprechen, eine Lösung des sog. „Constraint-Erfüllungsproblems“ (engl. "Constraint Satisfaction Problem (CSP)") für ein Constraint-Netz besitzt.

S. hierzu z.B. P. THAGARD: Explanatory Coherence. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 12. 1989. PP. 435-67, v.a. PP. 436-37, 438-44, 456-59 – K.J. HOLYOAK / P. THAGARD: Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 13. 1989. PP. 299-301 – P. THAGARD / K. VERBEURGT: Coherence as Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. PP. 1-24, v.a. PP. 2-4, 9-12, 13-14 – P. THAGARD: Coherence in Thought and Action. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2000. PP. 2-4, 4-6, 15-16, 16-20, v.a. PP. 18, 20-25, 25-37, 37-40, 245-73 – D.E. RUMELHART / P. SMOLENSKY / G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: Schemata and Sequential Thought Processes in

inhibitorischen technischen Synapsen modelliert werden.⁸⁰⁵

4.221 Die Komputationsprozesse in einem künstlichen neuronalen Netzwerk kann man dabei also mit dem U.S.-amerikanischen Physiker Paul SMOLENSKY⁸⁰⁶ – im Rahmen einer konnektionistischen bzw. subsymbolischen Strukturtheorie der Kognition⁸⁰⁷ – als ein Optimierungsproblem im Sinne des sog. "Pa-

PDP Models. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 7-57, v.a. PP. 35-36.

Einführend zur mathematischen bzw. logischen Definition der Konsistenz s. z.B. Th.G. BUCHER: Einführung in die angewandte Logik. Zweite, erweiterte Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1998. S. 166-170, v.a. S. 167 – H.W. GUESGEN: Constraints. In: G. GÖRZ et. al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verl. München, Wien. 2000. S. 267-87, v.a. S. 268-69.

S. auch B. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 161-76, v.a. S. 163: "Das Lösen von Kohärenzproblemen erweist sich somit als ein hochgradig rückgekoppelter Prozess sich gegenseitig voraussetzender relativer Bedingungen, der strukturell dem Problem des Lösens eines komplexen Systems von Differentialgleichungen entspricht. Hier wird eine Menge von Funktionen gesucht, wobei die einzig verfügbare Information in Relationen zwischen diesen Funktionen und ihren Ableitungen besteht. Wann immer man eine solche Relation zur Bestimmung einer dieser Funktionen unmittelbar auswerten will, muss man bereits die übrigen Funktionen kennen, deren Kenntnis sich aber unter anderem nur aus der Kenntnis derjenigen Funktionen ableiten ließe, die man gerade zu bestimmen trachtet."

Zum Begriff der sog. „Kohärenz“ (engl. "coherence") und der sog. „Konsistenz“ (engl. "consistency") s. auch die Ausführungen in Kap. 4.3.02, Fn. 20 und in Kap. 2.231, 2.232, 4.24, 5.1.01.232.

805 S. z.B. D. SIMON / K.J. HOLYOAK: Structural Dynamics of Cognition: From Consistency Theory to Constraint Satisfaction. Personality and Social Psychology Review. Vol. 6. 2002. P. 285: "In [connectionist models of constraint satisfaction (A.d.V.)], complex tasks are performed by networks in which the decision variables are interconnected by excitatory and inhibitory links representing positive and negative relations among the variables. Constraint satisfaction models operate by applying a relaxation algorithm that settles the network into a stable state in which the asymptotic activation levels of the units define a set of highly activated variables. Bidirectional activations enable units that mutually support each other via excitatory connections (i.e., those that 'go together') to become highly active, and collectively inhibit their rivals. The bidirectional influences between related units play a critical role in allowing the system to impose a coherent interpretation on the overall situation."

806 S. z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 18-19: "To sum up: a. Knowledge in subsymbolic computation is formalized as a large set of soft constraints. b. Inference with soft constraints is fundamentally a parallel process. c. Inference with soft constraints is fundamentally nonmonotonic. d. Certain subsymbolic systems can be identified as using statistical inference."

Im Rahmen der sog. „Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture (ICS)“ greift P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. PP. 250-54, v.a. P. 252 das "Parallel Soft Constraint Satisfaction"-Modell in Verbindung mit seiner sog. „Harmonietheorie“ (engl. "harmony theory") auf, worauf in Kap. 4.3.02 und 5.1.01.231 näher eingegangen wird.

807 Zum Begriff des sog. „Subsymbols“ (engl. "subsymbol") s. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.0 und 2.222.4.

parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling⁸⁰⁸ interpretieren: Wie bereits erwähnt⁸⁰⁹, wird mit der Architektur eines künstlichen neuronalen Netzwerks ein n -dimensionaler Systemzustandsraum aufgespannt, wobei die Netzwerkverbindungen mit ihren Gewichten die Beziehung zwischen den verschiedenen gewichteten (Merkmals-)Dimensionen darstellen, und ein Eingabemuster im Rahmen einer auf Vektoren beruhenden sog. „Distanzmetrik“ (engl. “distance metric“)⁸¹⁰ auf einen Punkt in diesem Systemzustandsraum abgebildet wird. Man kann nun die Verbindungen zwischen den Verarbeitungseinheiten als wechselseitige („weiche“) Rand- oder Nebenbedingungen bzw. als Be- und

808 Grundlegend s. z.B. D.E. RUMELHART / P. SMOLENSKY / G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: Schemata and Sequential Thought Processes in PDP Models. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 7-57, v.a. PP. 8-17.

Eine grundlegende Einführung hierzu bietet z.B. D.S. TOURETZKY: Connectionist and Symbolic Representations. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 262 – H.W. GUESGEN / J. HERTZBERG: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer Verlag. Berlin u.a. 1992. PP. 97-109.

S. auch W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 46-48 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. P. 334 – D. SIMON / K.J. HOLYOAK: Structural Dynamics of Cognition: From Consistency Theory to Constraint Satisfaction. Personality and Social Psychology Review. Vol. 6. 2002. P. 28 – P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 111-13.

S. auch St.J. READ / E.J. VANMAN / L.C. MILLER: Connectionism, Parallel Constraint Satisfaction Processes, and Gestalt Principles: (Re)Introducing Cognitive Dynamics to Social Psychology. Personality and Social Psychology Review. Vol. 1. 1997. PP. 26-53, v.a. PP. 32-37, die die Ähnlichkeiten zwischen den Parallel Constraint Satisfaction Prozessen und den Gestalt-Prinzipien (engl. “Gestalt principles“) der sog. „Gestaltpsychologie“ (engl. “Gestalt psychology“) der zwanziger und dreißiger Jahre des 20. Jhdts. nach den Psychologen Max WERTHEIMER, Wolfgang KÖHLER und Kurt KOFFKA hervorheben.

Einige der traditionellen Modelle im Konnektionismus sind z.B. das sog. “ACME Model“ von K.J. HOLYOAK / P. THAGARD: Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 13. 1989. PP. 295-355, das sog. “ECHO Model“ von P. THAGARD: Explanatory Coherence. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 12. 1989. PP. 435-67 und das sog. “DECO Model“ von P. THAGARD / E. MILLGRAM: Inference to the Best Plan: A Coherence Theory of Decision. In: A. RAM / D.B. LEAKE (Eds.): Goal-Driven Learning. MIT Press. Cambridge/MASS. 1995. PP. 439-54.

Eine verständliche Einführung hierzu bieten Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 90-101, v.a. S. 93-94 – G. DORFFNER: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 82-83 – M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München, Mering. 2001. S. 5.

Die englische Bezeichnung “(soft) constraint satisfaction“ wird im Deutschen i.d.R. mit „Erfüllung von (weichen) Randbedingungen“ wiedergegeben.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.242.

809 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.23 und 2.222.4.

810 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4 und 4.21.0.

Einschränkungen (engl. "(soft) constraints")⁸¹¹ auffassen, die sich aus den (Struktur-)Eigenschaften der Eingabevektoren sowie aus den bereits bestehenden Randbedingungen in Form der sog. „Konnektionsmatrix“ (engl. "connection matrix")⁸¹² ergeben. Ein künstliches neuronales Netzwerk ist nun – unter gewissen Voraussetzungen – bestrebt, seine sog. „Energiefunktion“ (engl. "energy function")⁸¹³ zu minimieren, d.h. während des Netzwerkablaufs, im allgemeinen, einen Zustand anzustreben, in dem nach Möglichkeit eine hohe Anzahl der Beschränkungen möglichst gut erfüllt werden, denn je höher die Anzahl der erfüllten Randbedingungen, umso geringer ist die (künstliche) sog. „Energie“ (engl. "energy") bzw. umso höher ist die sog. „Harmonie“ (engl. "harmony") eines künstlichen neuronalen Netzwerks i.S. P. SMOLENSKY's⁸¹⁴, definiert gemäß dem generellen konnektionistischen Algorithmus i.S. einer sog. „LYAPUNOV-Funktion“ (engl. "LYAPUNOV function")⁸¹⁵

$$E(t) = - \sum_i \sum_j w_{ij} a_i(t) a_j(t), \quad (49)$$

wobei $E(t)$ die Energie des Systems zum Zeitpunkt t , w_{ij} das Gewicht der Verbindung zwischen den Neuronen i und j , $a_i(t)$ ($a_j(t)$) die Aktivierung des Neurons i (j) zum Zeitpunkt t ist.⁸¹⁶

Die Kombination von elementaren in komplexere Konzepte im Rahmen von konnektionistischen Kohärenzalgorithmus⁸¹⁷ kann man demnach mit dem

811 Siehe z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 18-19.

812 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.212.

813 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.23 Fn. 95.

814 Siehe z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 18-19.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.02.

815 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.233, Fn. 92.

816 D.E. RUMELHART / P. SMOLENSKY / G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: Schemata and Sequential Thought Processes in PDP Models. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 13

S. hierzu auch P. THAGARD / K. VERBEURGT: Coherence as Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. P. 10: "Connectionist algorithms can be thought of as maximizing the 'goodness-of-fit' or 'harmony' of the network (...)."

S. hierzu auch St.J. READ / E.J. VANMAN / L.C. MILLER: Connectionism, Parallel Constraint Satisfaction Processes, and Gestalt Principles: (Re)Introducing Cognitive Dynamics to Social Psychology. Personality and Social Psychology Review. Vol. 1. 1997. PP. 26-53, v.a. P. 30: "This equation specifies that the energy of the system will decrease when the sign of the product of the activations is consistent with the sign of the weight between them, but will increase when the sign of the product of the activations differs from the sign of the weight between them. That is, if the product of the activations of two nodes is consistent with the constraint between them, energy decreases; whereas, if the activation of two nodes is inconsistent with the constraint between them, energy increases. Thus, this energy function essentially measures the extent to which the pattern of activations of the nodes is consistent with the relations between them. Hopfield (...) demonstrated that neural network systems of this form act so as to minimize the energy function, essentially minimizing the energy of the system."

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.232.

817 Einen Überblick hierzu bietet z.B. P. THAGARD / K. VERBEURGT: Coherence as Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. PP. 9-12.

Komputationsprozeß identifizieren, durch den ein Netzwerk im Rahmen der sog. „Gradientenabstiegsmethode“ (engl. “gradient descent method”)⁸¹⁸ auf jenen Punkt im Zustandsraum konvergiert, der im Vergleich zu den benachbarten Punkten möglichst viele der Randbedingungen zugleich erfüllt, d.h. bis, zumindest, ein relativ-stabiles lokales Minimum der Energiefunktion erreicht wird (sog. „lokale Kohärenz“ (engl. “local coherence”)), oder sogar alle gegenwärtigen Randbedingungen gleichzeitig erfüllt werden, d.h. bis ein stabiles globales Minimum der Energiefunktion erreicht wird (sog. „globale Kohärenz“ (engl. “global coherence”). Deswegen handelt es sich um „weiche“ (engl. “soft”) Randbedingungen, da sie nicht – wie z.B. Axiome in einem Kalkül der symbolischen Logik – mit Notwendigkeit erfüllt werden müssen, sondern nur bis zu einem gewissen Grad, d.h. mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gemäß den gewichteten Wahrscheinlichkeitsübergängen im Gesamtnetzwerk, m.a.W., es bleiben in den subsymbolischen Aktivitäten gewisse Wahrscheinlichkeitsaussagen erhalten.

4.222 Mit dem Psychologen und Philosophen Thomas GOSCHKE und dem Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Dirk KOPPELBERG⁸¹⁹ kann man nun die Arbeitsweise eines künstlichen neuronalen Netzwerks besser verstehen, wenn man zudem noch die Neuronen als (Mikro-)Hypothesen und den Aktivierungsgrad der Neuronen als das Maß für die „Bestätigung“ einer (Mikro-)Hypothese interpretiert, sodaß man mit P. SMOLENSKY⁸²⁰ postulieren kann, daß

Zum Begriff der sog. „Kohärenz“ (engl. “coherence”) s. auch die Ausführungen in Kap. 2.232.

818 Siehe z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 18-19.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.23.

819 Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 93 mit Hinweis auf P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988.

820 Zum sog. “The Structure/Statistics Dilemma” s. P. SMOLENSKY: The Constituent Structure of Connectionist Mental States: A Reply to Fodor and Pylyshyn. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. 1988. PP. 137-43, v.a. P. 138.

S. z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. P. 19: “The notion that each connection represents a soft constraint can be formulated at a higher level:

The Best Fit Principle: Given an input, a subsymbolic system outputs a set of inferences that, as a whole, gives a best fit to the input, in a statistical sense defined by the statistical knowledge stored in the system's connections.”

(...)

“To render the Best Fit Principle, it is necessary to provide precise definitions of ‘inferences’, ‘best fit’, and ‘statistical knowledge stored in the system's connections’. This is done in harmony theory, where the central object is the harmony function H which measures, for any possible set of inferences, the goodness of fit to the input with respect to the soft constraints stored in the connection strengths. The set of inferences with the largest value of H , that is, highest harmony, is the best set of inferences, with respect to a well-defined statistical problem.”

Siehe auch P. SMOLENSKY: Connectionist Modeling: Neural Computation / Mental Connections. In: J. HAUGELAND (Ed.): Mind Design II. Philosophy – Psychology – Artificial Intelligence. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1997. P. 243.

die Konnektionsmatrix subsymbolische statistische Inferenzprozeduren implementieren kann, indem sie die statistischen Strukturrelationen der Eingabevektoren kodiert, und dabei die relevanten statistischen Informationen extrahiert⁸²¹, wobei auf der subkonzeptuellen Ebene ein kooperativer Prozeß einer Vielzahl von sog. „Mikroinferenzen“ (engl. „microinferences“ oder „microconstraints“)⁸²² stattfindet, der auf der konzeptuellen Ebene als eine sog. „(Makro-)Inferenz“ (engl. „(macro-)inference“ oder „(macro-)constraint“) in Form eines (An-)Passungsmechanismus im Sinne der kognitiven Neuropsychologie⁸²³ und der Evolutionsbiologie⁸²⁴ aufgefaßt werden kann, wobei m.E. diese sog. „Mikroinferenzen“ mit der Philosophin Manuela LENZEN⁸²⁵ dabei den Verbindungsstärken zwischen den Berechnungseinheiten entsprechen, die die unwahrscheinlichen bzw. wahrscheinlichen Zusammenhänge zwischen den sog. „Mikroeigenschaften“ (engl. „microfeatures“)⁸²⁶ herstellen, die anhand der subsymbolischen Neuronenaktivitäten, den sog. „Subsymbolen“ (engl. „subsymbols“)⁸²⁷, kodiert werden.⁸²⁸

821 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.4.01 und 4.4.02.

822 S. z.B. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 40.

P. SMOLENSKY: *On the Proper Treatment of Connectionism*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 19-20 bezeichnet dies auch als sog. „Mikroentscheidungen“ (engl. „microdecisions“) bzw. sog. „Makroentscheidungen“ (engl. „macrodecisions“).

823 S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.25.07.

824 S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.25.06, 4.13.

825 M. LENZEN: *Natürliche und künstliche Intelligenz. Einführung in die Kognitionswissenschaft*. Campus Verl. Frankfurt/New York. 2002. S. 92-93.

826 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4.

827 Zum Begriff des sog. „Subsymbols“ (engl. „subsymbol“) s. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.0 und 2.222.4.

828 Dabei ist m.E. jedoch zu beachten, daß die Subsymbole als Neuronenaktivitäten im Zusammenspiel aus der Aktivierungs- und der Propagierungsfunktion zugleich die Funktion übernehmen, die Mikroeigenschaften als „statische Repräsentationsdaten“ zu kodieren und als „dynamische Repräsentationsprozesse“ an der sich ständig verändernden Festlegung der Verbindungsgewichte, gedeutet als Mikroschlußfolgerungen, mitzuwirken, m.a.W. ein Subsymbol vereinigt in sich gleichzeitig Speicher- und Berechnungseinheit.

Siehe hierzu die Ausführungen in H. Maurer: *Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte*. Kap. 5.5233. BoD-Verlag, Nordstedt. 2006, 2009.

4.23 (STOCHASTIC) GRADIENT DESCENT METHOD

4.230 Bei der klassischen sog. „Gradientenabstiegsmethode“ (engl. “gradient descent method”)⁸²⁹ in der Mathematik, auch als sog. „Methode des steilsten Abstiegs“ (engl. “steepest descent method”)⁸³⁰ bezeichnet, handelt es sich um eine direkte numerische (Optimierungs-)Methode mit der iterativen Form

$$x^{k+1} = x^k + \alpha_k \cdot d^k \quad (50)$$

wobei α_k die Schrittweite im Punkt x^k bezeichnet, d^k die Abstiegsrichtung im Punkt x^k , $x^1 = x^s$ den vorgegebenen Startpunkt, und, sofern man die Abstiegsrichtung in der Form $d = -\text{grad } f(x)$ wählt, der negative Gradient der Funktion in Richtung ihres steilsten Abstiegs zeigt, d.h., daß die Funktionswerte in dieser Richtung abnehmen, d.h. man versucht näherungsweise ein (lokales) Minimum einer vorgegebenen (Ziel-)Funktion $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ zu berechnen.

4.231 Im Konnektionismus berechnet das sog. „Gradientenabstiegs(-lern-)verfahren“ (engl. “gradient descent method”, “gradient descent learning”⁸³¹)⁸³² den Gradienten einer sog. „Fehlerfunktion“ (engl. “error func-

829 Eine grundlegende Einführung hierzu bietet z.B. J.F. BONNANS / J.Ch. GILBERT / Cl. LEMARÉCHAL / Cl.A. SAGASTIZÁBAL: Numerical Optimization. Theoretical and Practical Aspects. Springer Verlag. Berlin u.a. 2003. PP. 30-35 – M.A. BHATTI: Practical Optimization Methods with Mathematical Applications. Springer Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 254-61 – J.A. SNYMAN: Practical Mathematical Optimization. An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms. Springer Science+Business Media, Inc. 2005 PP. 34-35, 40-43 – R. FLETCHER: Practical Methods of Optimization. 2nd Ed. Wiley. Chichester. 1987. PP. 19-26, v.a. P. 22, PP. 26-33, 80-87 – H. BENKER: Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen. Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXEL. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2003. S. 165-173, v.a. S. 170-73 – M.W. HIRSCH / St. SMALE: Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra. Academic Press. New York u.a. 1974. PP. 199-204.

830 S. z.B. J.F. BONNANS / J.Ch. GILBERT / Cl. LEMARÉCHAL / Cl.A. SAGASTIZÁBAL: Numerical Optimization. Theoretical and Practical Aspects. Springer Verlag. Berlin u.a. 2003. P. 30 – M.A. BHATTI: Practical Optimization Methods with Mathematical Applications. Springer Verlag. Berlin u.a. 2000. P. 254 – J.A. SNYMAN: Practical Mathematical Optimization. An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms. Springer Publishing. 2005. PP. 40-43 – H. BENKER: Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen. Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXEL. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2003. S. 171.

831 S. z.B. M.R.W. DAWSON / D.A. MEDLER: Alberta's Dictionary of Cognitive Science. Gradient Descent Learning. 2010. From: http://www.bcp.psych.ualberta.ca/~mike/Pearl_Street/Dictionary/.

832 Grundlegend hierzu s. z.B. B. WIDROW / M.E. HOFF Jr.: Adaptive Switching Circuits. IRE Western Electric Show and Convention Record. Part 4. Institute of Radio Engineers. New York. PP. 96-104 – B. WIDROW / S.D. STEARNS: Adaptive Signal Processing. Prentice Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1985, PP. 46-65, v.a. PP. 56-60 – Fr. ROSENBLATT: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism. Spartan Books. Washington D.C. 1962 – D.E. RUMELHART / G.E. HINTON / R.J. WILLIAMS: Learning Internal Representations by Error Propagation. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 318-62 – G.E. HINTON: Connectionist Learning Procedures. Artificial Intelligence. Vol. 40. 1989. PP. 185-234. Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 106 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwen-

tion")⁸³³, d.h. es wird versucht beim Anlegen des Trainingsmusters den mittleren quadratischen Ausgangsfehler (engl. "Least-Mean-Square (LMS) error")⁸³⁴ der Verbindungsgewichtsvektoren zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Ausgabe für alle Trainingsmuster zu minimieren⁸³⁵, indem eine Veränderung aller Verbindungsgewichtsvektoren ΔW um einen Bruchteil des negativen Gradienten der Fehlerfunktion $-\nabla E(W)$ mit einem (Lern-)Faktor η , auch als Schrittweite bezeichnet, vorgenommen wird⁸³⁶:

$$\Delta W = -\eta \nabla E(W), \quad (51)$$

wobei aus dieser Fehlerminimierungsfunktion die sog. „Delta-Regel“ (engl. "delta rule"), auch als sog. „WIDROW⁸³⁷-HOFF⁸³⁸-Regel“ (engl. "WIDROW-HOFF

dungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 117-22, 124-26 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 48-49 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 14-15 – R.S. SUTTON / A.G. BARTO: Reinforcement Learning. An Introduction. A Bradford Book, The MIT Press. London. 1998. PP. 197-202, 210-15.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.23 und 2.232.

Zu den stochastischen Gradientenabstiegs(-lern-)verfahren (engl. "stochastic gradient descent methods") s. z.B. A. ENGEL / Chr. van den BROECK: Statistical Mechanics of Learning. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 149-52 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 124-26.

833 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.23.

834 Grundlegend s. z.B. B. WIDROW / S.D. STEARNS: Adaptive Signal Processing. Prentice Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1985, PP. 18-19, 80-87, 99-100.

Einführend s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 128-33 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 117-22.

835 Der Gesamtfehler E der Fehlerfunktion ergibt sich demnach anhand

$$E = 0.5 \sum_j (t_j - o_j)^2, \quad (52)$$

wobei t_j die Lerneingabe (engl. "teaching input") und o_j die Ausgabe des Neurons j ist.

S. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 106.

836 A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 106

837 Benannt nach dem U.S.-amerikanischen Elektrotechniker Bernard WIDROW.

838 Benannt nach dem U.S.-amerikanischen Elektroingenieur Marcian E. HOFF.

rule")⁸³⁹ bezeichnet, abgeleitet werden kann^{840,841}:

$$\Delta w_{ij} = \eta o_i \delta_j = \eta o_i (t_j - o_j), \quad (53)$$

wobei δ_j die Differenz ist zwischen der aktuellen Ausgabe o_j und der erwarteten Ausgabe t_j , dem sog. "teaching input"⁸⁴².

839 Das erste Beispiel einer Gradientenabstiegslernregel ist nach B. WIDROW / M.E. HOFF Jr.: Adaptive Switching Circuits. In: Proceedings of the IRE Western Electric Show and Convention (WESCON) Conference. Part 4. Institute of Radio Engineers. New York. 1960. PP. 96-104, v.a. PP. 97, 98-100, der sog. „ α -LMS-Algorithmus“, der dazu entwickelt worden war um ein sog. „Adaptives Lineares Neuron“ (engl. "adaptive linear neuron (Adaline)") zu trainieren, später auch als Adaptives Linearkombinations-Element (engl. "adaptive linear combiner element") bezeichnet. S. auch B. WIDROW / S.D. STEARNS: Adaptive Signal Processing. Prentice Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1985. PP. 15-29, 99-116.

Einführend s. z.B. H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 93-94, 117-19 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 12-15.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.211.

840 Und damit auch die allgemeine mathematische Form der sog. „HEBB'schen Lernregel“ (engl. "HEBB('s) rule").

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.213.

841 Grundlegend hierzu s. z.B. G.O. STONE: An Analysis of the Delta Rule and the Learning of Statistical Associations. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 444-59.

Einführend s. hierzu z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 85-86, 107 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 122-24.

Die sog. „Delta-(Lern-)Regel“ (engl. "delta (learning) rule") wird dabei i.d.R. nur im Rahmen von überwachten Lernverfahren mit Netzwerken verwendet, die über eine einzige trainierbare Neuronenschicht verfügen, deren technische Neuronen mit einer deterministischen, linearen Aktivierungsfunktion ausgestattet sind, wie z.B. dem sog. "Perceptron" von Frank ROSENBLATT.

Zur sog. "perceptron learning rule" s. z.B. B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 47-49.

Zum sog. „Perzeptron-Konvergenztheorem“ (engl. "perceptron convergence theorem") nach Fr. ROSENBLATT: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism. Spartan Books. Washington D.C. 1962.

S. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 137-43.

Eine Verallgemeinerung der Delta-Regel, die sog. "backpropagation (learning) rule", wird bei mehrschichtigen Netzwerken, deren technische Neuronen mit einer nichtlinearen Aktivierungsfunktion ausgestattet sind, verwendet.

Grundlegend zum Backpropagation-Algorithmus s. z.B. P.J. WERBOS: Beyond Regression. New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences. Ph.D. Dissertation. Harvard University. Cambridge/MA. 1974. Chap. II. PP. 48-59, 60-64 – D.E. RUMELHART / G.E. HINTON / R.J. WILLIAMS: Learning Internal Representations by Error Propagation. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 318-62.

Einführend s. hierzu z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 105-14, 115-26 – N. KASABOV: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 272-77.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.213 und 2.25.01.

842 Siehe hierzu die Ausführungen in Fn. 834.

4.24 STATISTICAL MECHANICS ANALYSIS

4.240 Die Analysemethode der Statistischen Mechanik (engl. "statistical mechanics")⁸⁴³, die im Rahmen der Statistischen Physik, vor allem in der Subdisziplin der Statistischen Thermodynamik, anhand der Arbeiten von J.C. MAXWELL, L. BOLTZMANN und J.W. GIBBS entwickelt worden ist, behandelt die statistische und wahrscheinlichkeitstheoretische Analyse von Vielteilchensystemen, sog. „(kanonischen) Ensembles“ (engl. "(canonical) ensembles") oder „GIBBS-Ensembles“⁸⁴⁴, und deren mikroskopischen Systemzuständen, wobei der Begriff der (statistischen) Entropie i.S. L. BOLTZMANN's von grundlegender Bedeutung ist gemäß

$$S = -k_B \ln w \quad (54) \text{ bzw.}$$

$$S = -k_B \sum_i w_i \ln w_i. \quad (55)^{845}$$

4.241 Diese Methode ist nun angewendet worden auf die Analyse von rekurrenten (künstlichen) neuronalen Netzwerken⁸⁴⁶, z.B. in Bezug auf (1) die bereits erörterte Konvergenzanalyse der neuronalen Dynamik i.B. auf stationäre At-

843 Einführend s. hierzu z.B. Fr. SCHWABL: Statistische Mechanik. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006 – Chr. GERTHSEN: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 923-45.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. P.N. KUGLER / M.T. TURVEY: Information, Natural Law, and the Self-Assembly of Rhythmic Movement: Theoretical and Experimental Investigations. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1987. PP. 51-59.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.10.

844 Unter einem sog. „(kanonischen) Ensembles“ (engl. "(canonical) ensembles") oder „GIBBS-Ensembles“, benannt nach dem U.S.-amerikanischen Physiker Josiah W. GIBBS, versteht man dabei ein betrachtetes (Vielteilchen-)System mit einer festgelegten Anzahl von Elementen und einem vorgegebenen Volumen, das in ein es umgebendes System, z.B. in ein Wärmebad, eingebettet ist, mit diesem über das Wärmereservoir einen Energieaustausch betreibt und sich mit diesem im thermischen Gleichgewicht befindet.

S. hierzu einführend z.B. Fr. SCHWABL: Statistische Mechanik. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006. S. 50-63, 508-509 – Chr. GERTHSEN: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 934-35.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 202-10 – I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. 6. Aufl. Piper. München, Zürich. (1986) 1990. S. 211-15.

845 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.10.

846 Grundlegend s. z.B. A.C.C. COOLEN: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks I – Statics. Handbook of Biological Physics. Vol. 4. 2001. PP. 553-618 – A.C.C. COOLEN: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks II – Dynamics. Handbook of Biological Physics. Vol. 4. 2001. PP. 619-84 – A. ENGEL / Chr. van den BROECK: Statistical Mechanics of Learning. Cambridge University Press. Cambridge. 2001.

Einführend s. z.B. B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 191-200, 201-208, 209-30, 231-45.

Einen eingehenden Überblick bietet z.B. P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: Neural Network Modeling. Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994. PP. 44-71, 72-109.

S. auch z.B. A. ZIPPELIUS: Statistical Mechanics of Neural Networks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 194. 1993. PP. 471-81 – J.W. CLARK: Statistical Mechanics of Neural Networks. Physics Reports. Vol. 158. 1988. PP. 91-157.

traktoren oder oszillatorische Orbits im Rahmen der sog. „Energiefunktion“ (engl. “energy function”)⁸⁴⁷, vor allem die des HOPFIELD-Modells und dessen Anwendung als ein assoziativer Gedächtnisspeicher (engl. “associative memory”)⁸⁴⁸ oder des WILLSHAW-Modells⁸⁴⁹, (2) die Analyse der neuronalen Dynamik anhand der Wellenmechanik (engl. “wave mechanics”) in Form von neuronalen (probabilistischen) Wellenfunktionen (engl. “neuronal wave functions”)⁸⁵⁰, wobei der Eigenzustand (engl. “eigenstate”) der „neuronalen Welle“ (engl. “neuronal wave”) die neuronale Information repräsentiert, und (3) die informationstheoretische Analyse von stochastischen Aspekten eines neuronalen Systems.⁸⁵¹

847 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.232.

848 S. z.B. D.J. AMIT / H. GUTFREUND / H. SOMPOLINSKY: Statistical Mechanics of Neural Networks near Saturation. *Annals of Physics*. Vol. 173. 1987. PP. 30-67 – H. SOMPOLINSKY: Statistical Mechanics of Neural Networks. *Physics Today*. Vol. 41. Iss. 12. 1988. PP. 70-80, v.a. PP. 74-75 – H. GUTFREUND: From Statistical Mechanics to Neural Networks and Back. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 163. 1990. PP. 373-85, v.a. PP. 374-78 – A. BOVIER / V. GAYRARD: Statistical Mechanics of Neural Networks: The Hopfield Model and the Kac-Hopfield Model. *Markov Processes and Related Fields*. Vol. 3. 1997. PP. 392-422.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.23, 4.22, 5.2.06.

849 S. z.B. H. SOMPOLINSKY: Statistical Mechanics of Neural Networks. *Physics Today*. Vol. 41. Iss. 12. 1988. PP. 70-80, v.a. PP. 75-76 mit Bezug auf D.J. WILLSHAW / O.P. BUNEMAN / H.C. LONGUET-HIGGINS: Non-Holographic Associative Memory. *Nature*. Vol. 222. 1969. PP. 960-62.

850 S. z.B. P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: Neural Network Modeling. *Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective*. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994. PP. 130-59.

851 S. z.B. P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: Neural Network Modeling. *Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective*. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994. PP. 110-29, 160-95.

4.25 ATTRACTOR MODELING

Die neuronale Dynamik eines (rekurrenten) neuronalen Netzwerks kann man, wie bereits erwähnt⁸⁵², im Rahmen von stochastischen Optimierungsproblemen anhand von konvergenten Prozessen in Form des mathematischen Konzepts des sog. „Attraktors“ (engl. “attractor”)⁸⁵³ analysieren (sog. “attractor modeling”)⁸⁵⁴, sodaß damit ein menschliches sog. „inhaltsbezogenes Gedächtnis“ (engl. “content-addressable memory”)⁸⁵⁵ modelliert werden kann, u.z. in Form von sog. „Attraktornetzwerken“ (engl. “attractor networks”)⁸⁵⁶. Die Fixpunkte ergeben sich dabei, bezogen z.B. auf das sog. „HOPFIELD Netzwerk“⁸⁵⁷, aus der entsprechenden sog. „Energiefunktion“ (engl. “energy function”)⁸⁵⁸ bzw. „LYAPUNOV-Funktion“ (engl. “LYAPUNOV function”)⁸⁵⁹ gemäß

$$E(t) = -0.5 \sum_i \sum_j w_{ij} o_i(t) o_j(t) - \sum_j e_j o_j(t), \quad (56)$$

wobei $E(t)$ die Energie des HOPFIELD-Netzwerks zum Zeitpunkt t , w_{ij} das Gewicht der Verbindung zwischen dem Neuron i und j , $o_i(t)$ und $o_j(t)$ die Ausgabe des Neurons i (j) zum Zeitpunkt t , und e_j die (externe, während der betrachteten Zeitdauer konstante) Eingabe in das Neuron j darstellt.⁸⁶⁰

852 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.220.

853 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.222, Fn. 71, 33.

854 S. z.B. X.-J. WANG: Attractor Network Models. In: L.R. SQUIRE (Ed.): Encyclopedia of Neuroscience. Vol. 6. Academic Press. Oxford. 2009. PP. 667-79.

855 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.284, Fn. 459, Kap. 4.241, Fn. 847, 848, 849, Kap. 5.2.06.2.

856 Grundlegend s. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989.

Eingehend s. z.B. A.C.C. COOLEN: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks I – Statics. Handbook of Biological Physics. Vol. 4. 2001. PP. 553-618 – A.C.C. COOLEN: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks II – Dynamics. Handbook of Biological Physics. Vol. 4. 2001. PP. 619-84 – H. GUTFREUND: From Statistical Mechanics to Neural Networks and Back. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 163. 1990. PP. 373-85, v.a. PP. 374-78.

Einführend s. z.B. G.W. COTTRELL: Attractor Networks. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 253-62 – G.W. COTTRELL: Computational Cognitive Neuroscience (CNNBook). Wiki Textbook. 2011. Chap. 3: Bidirectional Excitatory Dynamics and Attractors. From: <http://grey.colorado.edu/CompCogNeuro/index.php/CCNBook/Main> – N. BRUNEL / J.P. NADAL: Modeling Memory: What do we Learn from Attractor Neural Networks? In: Proceedings of Symposium: Memory, from Neuron to Cognition. Paris, April 17-18, 1997. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série III (Sciences de la Vie/Life Sciences). Vol. 321. 1998. PP. 249-52.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.2.06, 5.2.07.

857 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.03, Fn. 413.

858 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.23 Fn. 383, 4.241.

859 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.232, Fn. 380.

860 S. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 181-91 – J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 214-15.

4.26 AGENT-BASED MODELING: MULTI-AGENT SYSTEMS UND COLLECTIVE INFORMATION (METAHEURISTICS FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION)

4.260 Ein sog. „Multiagentensystem“ (engl. “Multi-Agent Systems (MAS)”) ⁸⁶¹, bestehend aus einer Vielzahl von zumeist sich gleichartig verhaltenden Subsystemen, eben den sog. „(Software-)Agenten“ (engl. “(software) agent”) ⁸⁶², die zumeist über nichtlineare, rückgekoppelte Informationsverarbeitungsprozesse miteinander wechselwirken, stellt mit den in ihm ablaufenden (stochastischen) Algorithmen ⁸⁶³ allgemein ein heuristisches (Lösungs-)Verfahren zur Bewältigung von komplexen, kombinatorischen Optimierungsproblemen dar (sog. “Stochastic Combinatorial Optimization Problems (SCOPs)” ⁸⁶⁴ oder “Agent-Based Modeling (ABM)”), wobei man, sofern entsprechende Prozesse in der Technik optimiert werden sollen, auch von sog. „Verteilter künstlicher Intelligenz“ (engl. “Distributed Artificial Intelligence (DAI)”) spricht. Diese auf der mikroskopischen Ebene stattfindenden Informationsverarbeitungsprozesse erzeugen nun auf der makroskopischen Ebene – zumeist sprunghaft – neue, emergente ⁸⁶⁵ Systemstrukturen, die wiederum globale sog. „Ordnungsparameter“ i.S. H. HAKEN's ⁸⁶⁶ konstituieren, die die einzelnen Systemindividuen „versklaven“ ⁸⁶⁷. Diese globalen Systemstrukturen repräsentieren somit für die Agenten eine Art von gemeinschaftlich selbstorganisiert erzeugter sog. „kollektiver

861 Eingehend s. z.B. J. FERBER: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston/MA. 1999.

Einführend s. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 68-74, 74-79 – Fr. SCHWEITZER: Selbstorganisation und Information. In: H. KRAPP / Th. WAGENBAUR (Hrsg.): Komplexität und Selbstorganisation – „Chaos“ in Natur- und Kulturwissenschaften. Wilhelm Fink Verlag. München. 1997. S. 99-129. Zur Definition eines sog. „Multiagentensystems“ (engl. “Multi-Agent Systems (MAS)”) s. J. FERBER: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston/MA. 1999. P. 11.

862 Zur Definition eines sog. „(Software-)Agenten“ (engl. “(software) agent”) s. J. FERBER: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston/MA. 1999. PP. 9, 12, 13.

863 Am meisten verbreitet sind der sog. „Ameisenkolonie-Algorithmus“ (engl. “Ant Colony Optimization (ACO) Algorithm”) und der „Partikelschwarm-Algorithmus“ (engl. “Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm”).

Eingehend s. z.B. M. DORIGO / V. MANIEZZO / A. COLORNI: Positive Feedback as a Search Strategy. Technical Report 91-016. Politecnico di Milano. Milano, Italy. 1991 – M. DORIGO / L.M. GAMBARDELLA: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 1. 1997. PP. 53-66 – J. KENNEDY / R.C. EBERHART: Particle Swarm Optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Vol. IV. IEEE Service Center. Piscataway/NJ. 1995. PP. 1942-48.

Einführend zu dem Modell eines sozialen Informationsverarbeitungssystems bei Ameisen s. z.B. T. STONIER: Information and Meaning: An Evolutionary Perspective. Springer-Verlag. London u.a. 1997. PP. 36-38.

S. hierzu auch Fn. 870, 871.

864 Einführend s. z.B. L. BIANCI / M. DORIGO / L.M. GAMBARDELLA / W.J. GUTJAHR: A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization. Natural Computing. Vol. 8. 2009. PP. 239-87, v.a. PP. 248-54, 254-57.

865 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.2.

866 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.25.02.

867 Zum sog. „Versklavungsprinzip“ i.S. H. HAKEN's s. die Ausführungen in Kpt. 1.25.02.

Information“ (engl. “collective information”)⁸⁶⁸ in einer „Informations-, Landschaft“⁸⁶⁹, sodaß dies als eine Konstitution von sog. „kollektiver Intelligenz“ (engl. “collective intelligence”)⁸⁷⁰ bzw. von sog. „Schwarmintelligenz“ (engl. “Swarm Intelligence (SI)”)⁸⁷¹ bezeichnet wird.

4.261 Am weitverbreitetsten ist in letzter Zeit eine Anwendung des sog. „Ameisenkolonie-Algorithmus“ (engl. “ant colony algorithm”)⁸⁷², u.a. auch im Rahmen von künstlichen neuronalen Netzwerken, auf diskrete und kontinuierliche kombinatorische Optimierungsprobleme (sog. “Ant Colony Optimization

868 Einführend s. z.B. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 74-79.

869 S. W. EBELING / J. FREUND / Fr. SCHWEITZER: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998. S. 75.

870 Eingehend s. z.B. I. COUZIN: Collective Minds. Nature. Vol. 445. 2007. P. 715 – I. COUZIN / J. KRAUSE: Self-Organization and Collective Behavior of Vertebrates. Advances in the Study of Behavior. Vol. 32. 2003. PP. 1-75.

Einführend s. z.B. W. SULIS: Fundamental Concepts of Collective Intelligence. Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences. Vol. 1. 1997. PP. 35-53, v.a. PP. 38-49 – J. FERBER: Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston/MA. 1999. PP. 1-58.

871 Grundlegend s. z.B. M. DORIGO / E. BONABEAU / G. THERAULAZ: Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press. New York. 1999.

872 Der Algorithmus basiert dabei auf dem Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche, wobei die Ameisen in kürzester Zeit von der am nächstgelegenen Futterstelle zurückkehren, sodaß sich die Wahrscheinlichkeit beständig erhöht, daß auch die nachkommenden Ameisen diesen Weg bevorzugt wählen, da sich dadurch die Pheromonkonzentration auf dem kürzesten Pfad am höchsten einstellt.

Der Kern des sog. „Ameisenkolonie-Algorithmus“ (engl. “simple Ant Colony Optimization (ACO) algorithm”) wird dabei – m.B.a. das sog. “Travelling Salesman Problem (TSP)” – definiert mit:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} & \text{für } j \in N_i \\ 0 & \text{für } j \notin N_i \end{cases}, \quad (57)$$

wobei $p_{ij}^k(t)$ diejenige Wahrscheinlichkeit angibt, mit der eine Ameise aus einer Stadt i in die nächste Stadt j wandert, abhängig von der „Attraktivität“ η_{ij} eines Pfades des Graphen, berechnet als das Inverse der Distanz zwischen zwei Städten, und abhängig von der dorthin führenden Pheromonspur τ_{ij} , N_i die Menge der (Nachbar-)Städte ist und über die Parameter α und β das Verhalten einer Ameise feiner justiert werden kann.

S. z.B. M. DORIGO / G. DI CARO: The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. In: D. CORNE / M. DORIGO / F. GLOVER (Eds.): New Ideas in Optimization. McGraw-Hill. London u.a. 1999. PP. 2-11, v.a. P. 7 – I. COUZIN / N.R. FRANKS: Self-Organized Lane Formation and Optimized Traffic Flow in Army Ants. Proceeding of the Royal Society of London. Series B 270. 2003. PP. 139-46 – M. DORIGO / Th. STÜTZLE: Ant Colony Optimization. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2004. PP. 1-23, v.a. PP. 5-6, 7-8, und PP. 121-27, v.a. P. 124.

Im sog. “S-AntNet” wird dabei eine Kostenfunktion für den Pfad eines Graphen zwischen jeweils zwei Knoten eines Netzwerks minimiert.

S. hierzu z.B. M. DORIGO / G. DI CARO: The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. In: D. CORNE / M. DORIGO / F. GLOVER (Eds.): New Ideas in Optimization. McGraw-Hill. London u.a. 1999. PP. 12-14.

S. auch Fn. 863.

(ACO)“)⁸⁷³, z.B. mit Bezug auf die Entscheidungsfindung auf Grund einer verstärkten emergenten synchronen Aktivität zwischen den (Ameisen-)Agenten in Form von “spiking neurons” (sog. “SpikeAnts model”)⁸⁷⁴, oder die Musterklassifikation (engl. “pattern classification”) von medizinischen Daten.⁸⁷⁵

873 Grundlegend s. z.B. M. DORIGO / V. MANIEZZO / A. COLORNI: Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. Vol. 26. 1996. PP. 29-41 – M. DORIGO / Th. STÜTZLE: Ant Colony Optimization. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2004 – M. DORIGO / G. DI CARO: The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. In: D. CORNE / M. DORIGO / F. GLOVER (Eds.): New Ideas in Optimization. McGraw-Hill. London u.a. 1999. PP. 4-8.

874 S. z.B. S. CHEVALLIER / H. PAUGAM-MOISY / M. SEBAG: Spike Ants, a Spiking Neuron Network Modelling the Emergence of Organization in a Complex System. In: J. LAFFERTY (Ed.): Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 23. 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'2010), 6-9 December 2010, Vancouver, Canada. 2010. PP. 379-87.

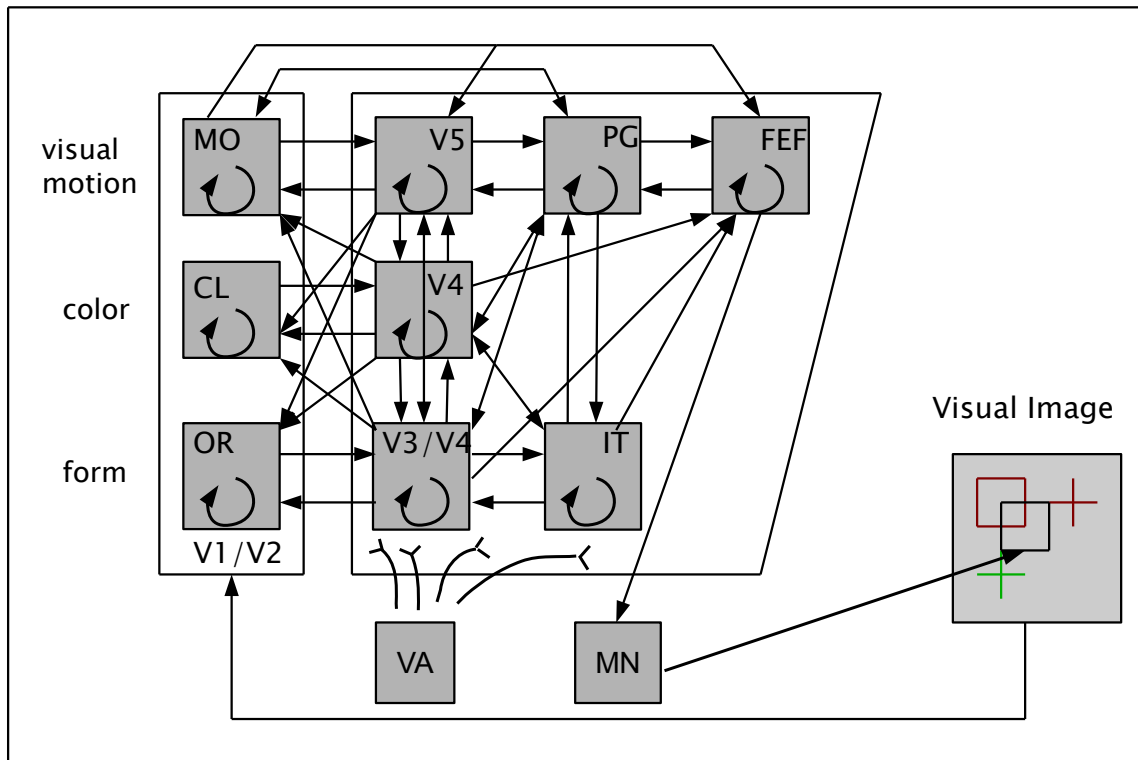
875 S. z.B. Chr. BLUM / Kr. SOCHA: Training Feed-Forward Neural Networks with Ant Colony Optimization: An Application to Pattern Classification. In: Proceedings of the Fifth Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS), 6-9 November 2005. 2005. PP. 233-38.

4.3 DIVERSE INFORMATIONSTHEORETISCHE MODELLKONZEPTIONEN

Im vorliegenden Kapitel werden im Folgenden diverse Modellkonzeptionen behandelt, die im Rahmen von quantitativen, informations- und wahrnehmungstheoretischen Analysen eine Lösung des Bindungsproblems in den kognitiven Neurowissenschaften in Form einer kohärenten integrierten neuralen (Informations-)Prozeßorganisation anstreben.

4.3.01 FUNCTIONAL CLUSTERING MODEL UND INFORMATION INTEGRATION THEORY NACH G.M. EDELMAN, G. TONONI UND O. SPORNS

4.3.01.0 Mit einem (Computersimulations-)Modell⁸⁷⁶ von G.M. EDELMAN und



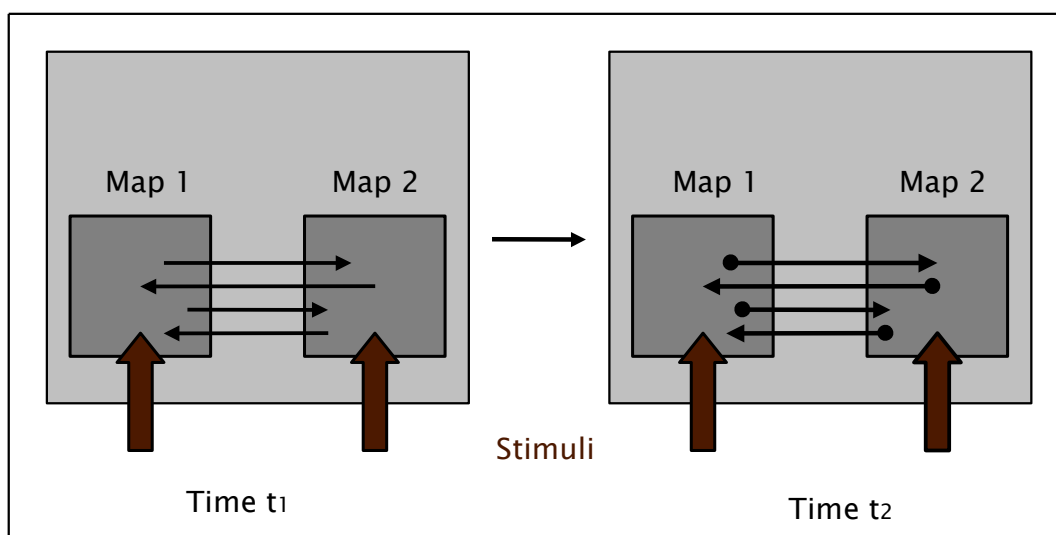
Graphik.25: Schematisches Diagramm des (Computersimulations-)Modells des visuellen Systems: Die funktional spezialisierten visuellen Areale sind hier als Kästchen dargestellt, die Leitungsbahnen zwischen ihnen, bestehend aus mehreren Tausenden von einzelnen Faserverbindungen, als Pfeile. Das Modell umfaßt dabei drei parallele Informationsverarbeitungspfade, die die Analyse der visuellen Bewegung (engl. "visual motion") (obere Reihe), der Farbe (engl. "color") (mittlere Reihe), und der Form (engl. "form") (untere Reihe) umfassen. Das visuelle Bild (engl. "visual image"), das anhand einer Farbkamera abgetastet wird, wird durch den großen Kasten rechts unten dargestellt (angelehnt an G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: Reentry and the Program of Integrating Multiple Cortical Areas: Simulation of Dynamic Integration in the Visual System. Cerebral Cortex. Vol. 2. 1992. P. 315).

876 S. G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: Reentry and the Program of Integrating Multiple Cortical Areas: Simulation of Dynamic Integration in the Visual System. Cerebral Cortex. Vol. 2. 1992. PP. 310-35: Das Modell enthält insgesamt etwa 10.000 Neurone, die über etwa 1.000.000 Verknüpfungen miteinander verbunden sind.

Nach einer gewissen Trainingszeit ist das Computermodell imstande, etwa zwischen 100-250 Millisekunden nach einer optischen Präsentation, bestehend z.B. aus einem roten Kreuz, einem roten Quadrat und einem grünen Kreuz, ersteres mit 95% Wahrscheinlichkeit herauszufinden, wobei die Aktivitäten der Neurone, die dabei auf verschiedene Attribute desselben Objekts ansprechen, z.B. die Bewegung bzw. die Lage, die Farbe und die Form, im Millisekundenbereich synchron sind.

Eine Einführung hierzu bietet G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 114-19 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 159-63).

G. TONONI der kortikalen reentranten⁸⁷⁷ Integration im visuellen System (s. Graphik.25) und einem sehr viel detaillierteren (Computersimulations-)Modell⁸⁷⁸ von E.D. LUMER, G.M. EDELMAN und G. TONONI zur Dynamik von reentranten Interaktionen zwischen kortikalen Arealen des thalamokortikalen Systems⁸⁷⁹ haben der U.S.-amerikanische Mediziner und Neurobiologe Gerald M. EDELMAN⁸⁸⁰ und der italienische Psychiater und Neurowissenschaftler Giu-



Graphik.26: Schematisches Diagramm des Konzepts des sog. "Re-Entry" bzw. des "Reentrant Mapping": Die (Gehirn-)Karten (engl. "maps") koordinieren sich räumlich und zeitlich über reziproke Faserverbindungen anhand eines andauernden Informationsverarbeitungsflusses, wobei die schwarzen Punkte die dadurch sich verstärkenden Synapsen verdeutlichen (angelehnt an G.M.EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. P. 84).

877 S. Fn. 883.

878 S. E.D. LUMER / G.M. EDELMAN / G. TONONI: Neural Dynamics in a Model of the Thalamocortical System, 1: Layers, Loops, and the Emergence of Fast Synchronous Rhythms. Cerebral Cortex. Vol. 7. 1997. PP. 207-27 – E.D. LUMER / G.M. EDELMAN / G. TONONI: Neural Dynamics in a Model of the Thalamocortical System, 2: The Role of Neural Synchrony Tested Through Perturbations of Spike Timing. Cerebral Cortex. Vol. 7. 1997. PP. 228-36: Das Modell enthält insgesamt etwa 65.000 Neurone, die über etwa 5.000.000 Verknüpfungen miteinander verbunden sind.

Eine Einführung hierzu bietet G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 119-20 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 163-64)

879 S. hierzu z.B. H. WALTER: Die neuronalen Grundlagen des Bewusstseins. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. S. 559-62, v.a. S. 560 – H. WALTER / S. MÜLLER: Die neuronalen Grundlagen des Bewusstseins. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2012. S. 662-63. S. auch z.B. G.M. EDELMAN / G. TONONI: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 64.

880 Zur Person Gerald M. EDELMAN's siehe die Website http://www.nsi.edu/index.php?page=gerald_m_edelman.

lio TONONI⁸⁸¹ eine Lösung für das sog. "Binding Problem"⁸⁸² der neuronalen Aktivitäten verschiedener, funktional separierter kortikaler Areale vorschlagen: Entscheidend sei demnach die neuronale Dynamik einer sog. „re-entranten“⁸⁸³ Prozeßorganisation⁸⁸⁴ (engl. "Re-entry"⁸⁸⁵), d.h. der (temporalen) Synchronisation⁸⁸⁶ der Aktivität zwischen Gruppen von neuronalen (Sub-)Populationen in demselben kortikalen Areal oder zwischen verschiedenen kortikalen Arealen, vermittelt über das Vorhandensein von wechselwirkenden bzw. wechselseitigen spannungsabhängigen (Faser-)Verknüpfungen⁸⁸⁷, sowie die rasche Veränderung der Verbindungsstärke dieser Ver-

881 Zur Person Giulio TONONI's siehe die Website <http://tononi.psychiatry.wisc.edu/People/Giulio-Tononi.html>.

882 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.3 und 3.41.

883 Zum Begriff einer sog. „reentranten Funktion“ (engl. "reentrant function") in der Informatik s. z.B. D. JHA: Use Reentrant Functions for Safer Signal Handling. IBM. Developer-Works. Technical Topics. Linux. Technical Library. 2005: "A *reentrant* function is one that can be used by more than one task concurrently without fear of data corruption. Conversely, a *non-reentrant* function is one that cannot be shared by more than one task unless mutual exclusion to the function is ensured either by using a semaphore or by disabling interrupts during critical sections of code. A reentrant function can be interrupted at any time and resumed at a later time without loss of data. Reentrant functions either use local variables or protect their data when global variables are used."

S. auch z.B. G.M. EDELMAN / G. TONONI: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 56.

884 Unter einer sog. „reentranten“ Prozeßorganisation (engl. "Re-entry") versteht man eine raumzeitliche Synchronisation und Koordination der Funktionen von räumlich getrennten Gehirnkarten, die sich gründen auf einen permanenten, simultanen und parallelen (Selektions-)Prozeß der Informationsverarbeitung zwischen den neuronalen Gruppen in den Netzwerken dieser Gehirnkarten unter Verwendung einer Vielzahl von parallelen, reziproken und rekurrenten (Faser-)Verknüpfungen.

S. z.B. G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987. PP. 163-73, 308-11 – G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 47-50, 82-86, 105-107 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 56, 66, 72-74, 117-19, 145-47) mit der „Streichquartett“-Metapher – O. SPORNS: Selectionist and Instructionist Ideas in Neuroscience. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 4-26, v.a. P. 13.

S. auch Fn. 883, 885.

885 S. z.B. G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987. PP. 60-64, 325-26 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. PP. 474-84, v.a. P. 475 – G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. P. 85 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 117) – O. SPORNS: Selectionist and Instructionist Ideas in Neuroscience. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 4-26, v.a. PP. 19-22. S. auch Fn. 883, 884.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.13.

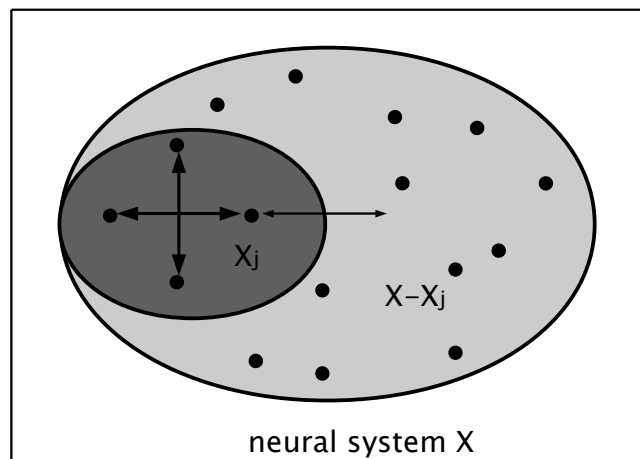
886 S. G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: Reentry and the Program of Integrating Multiple Cortical Areas: Simulation of Dynamic Integration in the Visual System. Cerebral Cortex. Vol. 2. 1992. PP. 330-31.

887 S. G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: Reentry and the Program of Integrating Multiple Cortical Areas: Simulation of Dynamic Integration in the Visual System. Cerebral Cortex. Vol. 2. 1992. P. 330.

knüpfungen. Damit sei dieser kohärente Prozeß als das Ergebnis von reentranten Wechselwirkungen zwischen mehreren Neuronen(-sub-)populationen in verschiedenen, z.T. räumlich weit auseinanderliegenden kortikalen Arealen als der fundamentale Mechanismus der neuralen Integration zu betrachten (s. Graphik.26).

4.3.01.1 FUNCTIONAL CLUSTERING MODEL NACH G.M. EDELMAN UND G. TONONI

4.3.01.10 Um nun ein quantitatives Kriterium für das Vorliegen dieses kohärenten integrierten neuralen Prozesses zu definieren, gehen G.M. EDELMAN und G. TONONI⁸⁸⁸ von der grundlegenden Überlegung aus, daß eine (Sub-)Klasse von Systemelementen innerhalb eines Systems dann als ein integriertes Subsystem zu verstehen sei, wenn diese Systemelemente über einen gewissen Zeitraum hinweg untereinander sehr stark und mit dem Rest des Systems nur schwach wechselwirken, d.h. man hat die Abweichung von der Unabhängigkeit – i.S. der (multivaria(n)ten) Statistik⁸⁸⁹ – bei



Graphik.27: Diagramm eines des sog. "Functional Clustering": Die kleine Ellipse stellt einen funktionalen Cluster (engl. "functional cluster") dar, d.h. eine Untermenge an Gehirnregionen, dargestellt als Punkte, die stark miteinander interagieren, verdeutlicht anhand der gekreuzten Pfeile, und nur schwach mit dem Rest des Gehirns interagieren, verdeutlicht anhand des schwächeren Pfeils (angelehnt an G.M.EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. P. 122).

S. auch G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. P. 118: Diesen Verknüpfungen entsprechen im lebenden Gehirn die sog. „NMDA(N-Methyl-D-Aspartat)-Rezeptoren“ für den Neurotransmitter Glutamat.
888 S. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. NeuroImage. Vol. 7. 1998. PP. 134-35. Eine Einführung hierzu bietet G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 120-24 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 164-70).
889 S. hierzu z. B. J. BORTZ: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 1999. S. 425-624.

allen Systemelementen eines Systems gleichzeitig und allgemein zu bestimmen, sodaß man eine solche Subpopulation von stark miteinander wechselwirkenden Neuronen, als den Systemelementen, die sich damit vom übrigen System in ihrer Funktion abgesondert haben, als einen sog. „funktionalen Cluster“ (engl. “functional cluster”)⁸⁹⁰ bezeichnet, und die betreffende statistische Methode als sog. „funktionales Clustering“ (engl. “functional clustering”)⁸⁹¹ (s. Graphik.27) :

4.3.01.11 Betrachtet man nun ein isoliertes neuronales System X , bestehend aus n neuronalen Systemelementen $\{x_i\}$, den Neuronen, und nimmt man an, daß die Aktivität dieser Elemente anhand von stationären multidimensionalen stochastischen Prozessen beschrieben wird⁸⁹², dann kann die sog. „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“ (engl. “probability density function”)⁸⁹³, die solch einen multivariaten Prozeß beschreibt, im Sinne der sog. „Informationsentropie“ (engl. “information entropy”) H i.S. von C.E. SHANNON und W. WEAVER⁸⁹⁴ verstanden werden, die als eine logarithmische Funktion begriffen wird, die die Anzahl der in diesem System möglichen diskreten Systemzustände – hier: die neuronalen Aktivitätsmuster – gewichtet nach der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens berechnet.

Unter der Annahme, daß bei einem neuronalen System X , bestehend aus n neuronalen Systemelementen $\{x_i\}$, die Komponenten voneinander unabhängig sind, d.h. daß jeder statistisch mögliche Systemzustand mit einer stets gleichen Wahrscheinlichkeit eintritt, beträgt die Anzahl der möglichen Systemzustände N , die das System einnehmen kann 2^n , was einer Systementropie

$$H(X) = \text{Id } N = \log_2 2^n = n \quad (58)$$

Bits an Information entspricht, wobei in diesem Fall die Entropie des Systems $H(X)$ die Summe der Entropien seiner einzelnen Komponenten $H(x_i)$ darstellt. Die Differenz zwischen der Summe der Entropien von sämtlichen einzelnen, voneinander unabhängig betrachteten Komponenten $\{x_i\}$ und der Entropie des Systems als Ganzes gesehen $H(X)$, vermittelt daher einen

890 S. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. P. 134.

891 S. z.B. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. PP. 133-49, v.a. PP. 134-35 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 2. 1998. PP. 475-76.

Eine Einführung hierzu bietet G.M. EDELMAN / G. TONONI: *A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination*. Basic Books. New York. 2000. PP. 113-54 (dt.: *Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht*. Beck. München. 2002. S. 155-89).

892 Basierend auf GAUSS-Funktionen.

S. hierzu allgemein z.B. Th.M. COVER / J.A. THOMAS: *Elements of Information Theory*. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Hoboken/NJ. 2006 – A. PAPOULIS: *Probability, Random, Variables, and Stochastic Processes*. 3rd Ed. McGraw-Hill. New York. 1991. v.a. PP. 533-602.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

893 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.1.

894 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.11.

Wert für die Integriertheit $I(X)$ des neuronalen Systems X ⁸⁹⁵:

$$I(X) = \sum_{i=1}^n H(x_i) - H(X) \quad (59)$$

Eine zunehmende Integration einer Partition des neuronalen Systems X durch eine vermehrte Wechselwirkung i.S. einer zunehmenden statistischen Korrelation der einzelnen Elemente untereinander verringert somit die Anzahl der möglichen Zustände, die das System als Ganzes einnehmen kann, da zumindest einige der Zustände somit wahrscheinlicher, oder weniger wahrscheinlich, würden, als wenn alle Elemente unabhängig voneinander wären, und führt damit auch zu einem Verlust der Entropie des Gesamtsystems $H(X)$ im Vergleich zur Summe der Entropien $H(x_i)$ von sämtlichen einzelnen, voneinander unabhängig betrachteten Komponenten $\{x_i\}$, so daß sich der Wert für die Integriertheit $I(X)$ erhöht.

Betrachtet man nun eine Bipartition des isolierten neuronalen Systems X , d.h. ein Subsystem bzw. eine beliebige Untermenge j aus k Systemelementen, dann kann man mit dem Integrationswert $I(X_j^k)$ die statistische Abhängigkeit insgesamt innerhalb der Untermenge berechnen und die zwischen der Untermenge (X_j^k) und dem Komplement $(X - X_j^k)$, d.h. dem übrigen System, so daß man ein Maß für den wechselseitigen Austausch an Information (engl. "Mutual Information (MI)")⁸⁹⁶ einer beliebigen Subpopulation von Elementen mit dem übrigen System erhält, die gegeben ist durch

$$MI(X_j^k; X - X_j^k) = H(X_j^k) + H(X - X_j^k) - H(X), \quad (60)$$

wodurch somit ein Maß geliefert wird, inwieweit die Entropie von (X_j^k) anhand der Entropie ihres Komplements $(X - X_j^k)$ gegeben ist.

Daraus läßt sich nunmehr für jede beliebige Untermenge j ein funktionaler sog. „Clusterindex“ (engl. "Cluster Index (CI)") definieren⁸⁹⁷:

$$CI(X_j^k) = \frac{I(X_j^k)}{MI(X_j^k; X - X_j^k)}, \quad (61)$$

wobei die beiden Terme $I(X_j^k)$ und $MI(X_j^k; X - X_j^k)$ entsprechend zu normieren sind, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Größe der jeweili-

895 S. z.B. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. P. 134 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 2. 1998. P. 476.

896 S. z.B. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. P. 134 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 2. 1998. P. 476.

897 S. z.B. G. TONONI / A.R. McINTOSH / D.P. RUSSELL / G.M. EDELMAN: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. P. 134 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 2. 1998. P. 476.

gen Untermengen zu berücksichtigen. Demnach identifiziert man einen funktionalen Cluster, sofern sein Clusterindex statistisch signifikant über dem Wert liegt, den man für ein homogenes System erwarten würde, da es sich in diesem Fall um eine Subpopulation von Elementen handelt, die untereinander stark und mit dem übrigen System nur schwach wechselwirken, und die ihrerseits keine kleinere Untermenge mit einem hohen Clusterindex enthält.

4.3.01.12 Nachdem man die Integriertheit einer neuralen Subpopulation mit dem Clusterindex feststellen kann, d.h., daß ein neuraler Prozeß integriert ist, definieren nun G.M. EDELMAN und G. TONONI⁸⁹⁸, in welchem (Aus-)Maß er integriert ist, u.z. vermittelt des Gesamtmaßes des Differenziertheitsgrads eines neuralen (Gesamt-)Systems, den man dadurch berechnet, daß man die wechselseitige Information $MI(X_j^k; X - X_j^k)$ für jede Subpopulation des neuralen Systems und das übrige System für alle möglichen Fälle der Aufspaltung des Gesamtsystems mittelt, wobei man wiederum eine Bipartition eines isolierten neuralen Systems X betrachtet, d.h. eine Subpopulation j aus k Elementen dieses Systems (X_j^k) sowie deren Komplement ($X - X_j^k$). Die wechselseitige Information drückt demnach aus, in welchem Maße die Zustände der Subpopulation (X_j^k) zur Differenziertheit der Zustände des übrigen Systems beitragen, oder umgekehrt.

Dieses Gesamtmaß des Differenziertheitsgrads eines neuralen (Gesamt-)Systems, den G.M. EDELMAN und G. TONONI als sog. „neurale Komplexität“ (engl. “neural complexity”) C_N bezeichnen, läßt sich nunmehr definieren durch⁸⁹⁹:

$$C_N(X) = \sum_{k=1}^{n/2} \langle MI(X_j^k; X - X_j^k) \rangle, \quad (62)$$

wobei die durchschnittliche wechselseitige Information zwischen den Subpopulationen X_k , bestehend aus k von n Elementen des Systems, und ihren jeweiligen Komplementen als $\langle MI(X_j^k; X - X_j^k) \rangle$ notiert wird, und der Index j besagt, daß der Durchschnitt über sämtlichen Kombinationen von k Elementen ermittelt wird. Demnach wird der Wert für die Komplexität eines neuralen Systems hoch ausfallen, wenn, erstens, beide Subpopulationen, (X_j^k) und ($X - X_j^k$), möglichst viele unterschiedliche Zustände einnehmen können, d.h. ihre Entropien müssen hoch sein, d.b. die Subpopulationen

898 S. G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: A Measure for Brain Complexity: Relating Functional Segregation and Integration in the Nervous System. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 91. 1994. PP. 5033-37, v.a. P. 5034.

Eine Einführung hierzu bietet G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 125-54 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 171-89, v.a. S. 176-78).

899 S. z.B G. TONONI / O. SPORNS / G.M. EDELMAN: A Measure for Brain Complexity: Relating Functional Segregation and Integration in the Nervous System. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 91. 1994. P. 5034 – G. TONONI / G.M. EDELMAN / O. SPORNS: Complexity and Coherency: Integrating Information in the Brain. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. PP. 476-80, v.a. P. 477.

sind spezialisiert, und, zweitens, müssen die Zustände von (X_j^k) und $(X-X_j^k)$ statistisch voneinander abhängig sein, d.h., die Entropie von (X_j^k) muß zu einem großen Teil durch die Wechselwirkungen mit $(X-X_j^k)$ bestimmt sein, und umgekehrt, d.h. die betreffende Subpopulation ist integriert. Damit gelangt man zu dem Ergebnis, daß ein hohes Komplexitätsniveau offenbar einer optimalen Synthese aus funktionaler Spezialisiertheit und funktionaler Integriertheit von neuronalen Prozessen innerhalb eines Systems entspricht. Dabei läßt sich eine Veränderung des neuronalen Komplexitätsgrads als einer optimalen Balance zwischen der Segregation und der Integration von Funktionen nicht nur anhand der neuroanatomischen Konnektivität, d.h. des betreffenden Verknüpfungsmusters, erreichen, sondern auch allein auf Grund der dynamischen Modulation der neurophysiologischen Aktivität, d.h. des betreffenden Erregungs- bzw. Entladungsmusters, m.a.W. ein hohes Komplexitätsniveau ergibt sich aus einer hohen Anzahl an möglichen Entladungsmustern in einem Subsystem mit einer unterschiedlichen (Wechsel-)Wirkung auf das Gesamtsystem.⁹⁰⁰

4.3.01.2 INFORMATION INTEGRATION THEORY (IIT) (OF CONSCIOUSNESS) NACH G. TONONI UND O. SPORNS

4.3.01.21 Daran anknüpfend haben der italienische Psychiater und Neurowissenschaftler Giulio TONONI⁹⁰¹ und der Neuro- und Kognitionswissenschaftler Olaf SPORNS⁹⁰² die sog. „Informationsintegrationstheorie (des Bewußtseins)“ (engl. „Information Integration Theory (IIT) (of consciousness)“)⁹⁰³ entwickelt, wonach das Phänomen „Bewußtsein“ als ein meßbares (intrinsisches) Vermögen (engl. „capacity“) eines diskreten dynamischen (bio-)physikalischen Systems aufgefaßt wird, welcher Betrag an sog. „integrierter Information“ (engl. „integrated information“) erzeugt werden kann, indem im Rahmen eines Informationsverarbeitungsprozesses, ausgehend von einem Repertoire (engl. „repertoire“) von möglichen Zuständen $\{x_j\}$, von einem bestimmten (bewußten) Zustand zum nächsten übergegangen wird. Betrachtet man nun ein neurales System X in Form eines ge-

900 S. G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 130-31 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 178): „Thus, we reach the important conclusion that high values of complexity correspond to an optimal synthesis of functional specialization and functional integration within a system.“

901 S. Fn. 881.

902 Zur Person Olaf SPORNS' siehe die Website <http://psych.indiana.edu/faculty/osporns.php>.

903 Grundlegend s. z.B. G. TONONI / O. SPORNS: Measuring Information Integration. BMC Neuroscience. Vol. 4/31. 2004. PP. 1-20, v.a. PP. 2-4 – G. TONONI: An Information Integration Theory of Consciousness. BMC Neuroscience. Vol. 5/42. 2004. PP. 1-22, v.a. PP. 3-6.

Eingehend s. z.B. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PloS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. PP. 3-8.

Eine Einführung hierzu bietet G. TONONI: Consciousness and the Brain: Theoretical Aspects. In: G. ADELMAN / B. SMITH (Eds.): Encyclopedia of Neuroscience. 3rd Ed. Elsevier. Amsterdam, Oxford u.a. 2004. PP. 1-16, v.a. PP. 6-9.

richteten Graphen, bestehend aus n abstrakten neuronalen (System-)Elementen mit einem finiten Repertoire an Ausgaben, z.B. '0' und '1', und nimmt man an, daß die Elemente mit kausalen Mechanismen in Form von AND- oder XOR-(Aktivierungs-)Regeln ausgestattet sind, dann besteht die erzeugte Information darin, um wieviel die Ungewißheit (engl. "uncertainty") des Repertoires – i.S. einer Wahrscheinlichkeitsverteilung (engl. "probability distribution") der Menge der Ausgabezustände des Systems – reduziert worden ist, sofern von einem Zustand x_0 in den darauffolgenden x_1 übergegangen worden ist.⁹⁰⁴ Diese Reduktion anhand der derart gemessenen kausalen Elementinteraktionen wird nun als sog. „effektive Information“ (engl. "effective information") ei bezeichnet, die definiert wird als die (relative) Entropie (engl. "relative entropy")⁹⁰⁵ i.S. einer Differenz zwischen dem potentiellen (a priori) Repertoire $p^{max}(X_0)$ ⁹⁰⁶ und dem aktuellen (a posteriori) Repertoire⁹⁰⁷ $p(X_0 \rightarrow x_1)$ gemäß (s. Graphik.28)⁹⁰⁸:

$$ei(X_0 \rightarrow x_1) = H[p(X_0 \rightarrow x_1) \| p^{max}(X_0)] \quad (63)^{909}$$

In Ergänzung zur effektiven Information, die nur angibt, wieviel Information erzeugt worden ist, ist nun zusätzlich zu ermitteln, inwieweit diese erzeugte Information auch integriert worden ist, sodaß man darüber hinaus zu berechnen hat, wieviel Information das System als ein Ganzes erzeugt im Vergleich zu der Information, die unabhängig davon von den kombinierten einzelnen Partitionen des Systems erzeugt wird. Diese sog. „integrierte Information“ (engl. "integrated information") ϕ ist dabei definiert als die Entropie des a posteriori Repertoires des Systems als Ganzem relativ zu dem

904 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 3.

905 Zur Definition der sog. (relative) Entropie (engl. "relative entropy"), auch bezeichnet als "KULLBACK-LEIBLER (KL) divergence (distance)" s. z.B. Th.M. COVER / J.A. THOMAS: Elements of Information Theory. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Hoboken/NJ. 2006, v.a. PP. 250-52, v.a. P. 251 – P. DAYAN / L.F. ABBOTT: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001. PP. 125-29, v.a. P. 128.

906 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 3: "The a priori repertoire is the probability distribution on the set of possible outputs of the elements considered independently, with each output equally likely. (...) The a priori repertoire coincides with the maximum entropy (maxent) distribution on the states of the system; we denote it by $p^{max}(X_0)$."

907 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 3: "The a posteriori repertoire $p(X_0 \rightarrow x_1)$ is the repertoire of states that could have led to x_1 through causal interactions. (...) The a posteriori repertoire is formally captured by Bayes' rule (...)."

908 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 3.

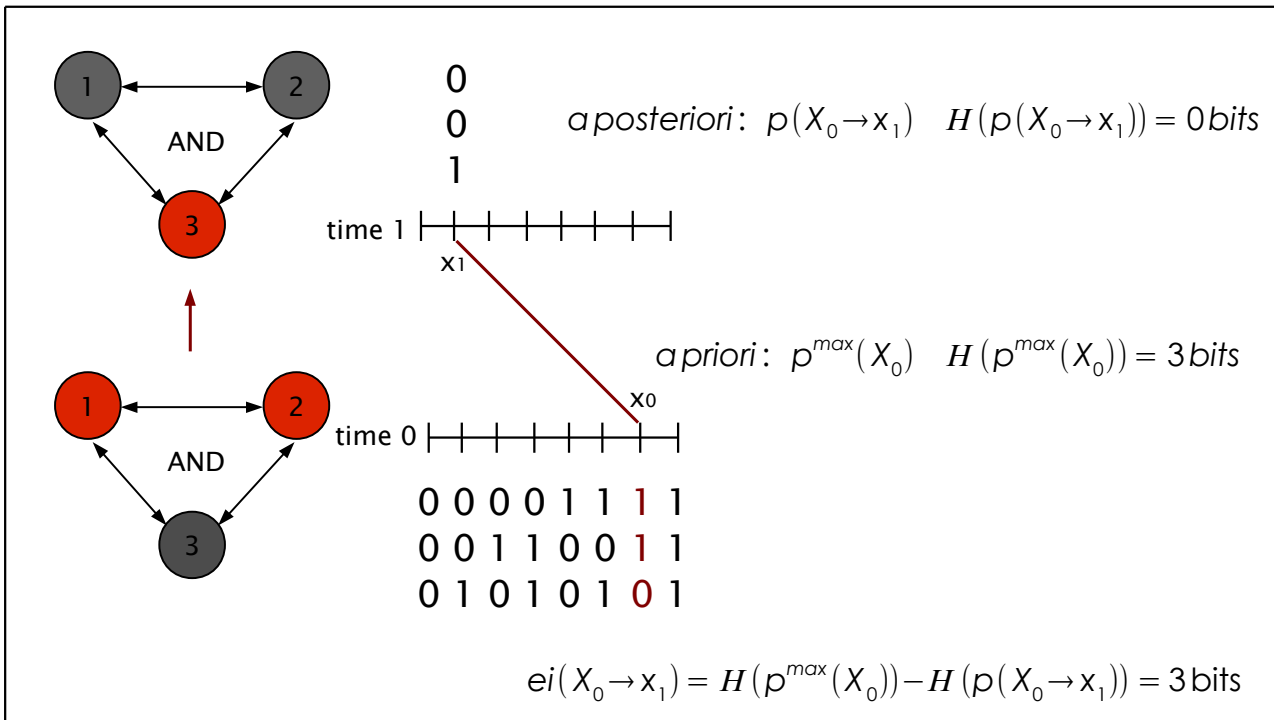
909 Nach D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 4 kann die sog. „effektive Information“ (engl. "effective information") ei auch vereinfachender als eine Differenz von Entropien geschrieben werden gemäß:

$$ei(X_0 \rightarrow x_1) = H(p^{max}(X_0)) - H(p(X_0 \rightarrow x_1)). \quad (64)$$

kombinierten a posteriori Repertoire der Partitionen gemäß⁹¹⁰:

$$\phi(x_1) = H \left[p(X_0 \rightarrow x_1) \parallel \prod_{M^k \in P^{MIP}} p(M_0^k \rightarrow \mu_1^k) \right], \quad (65)$$

wobei M und μ beliebige Partitionen bezeichnen und P^{MIP} die sog. minimale Informationspartition (engl. "minimum information partition").⁹¹¹



Graphik.28: Illustration der Erzeugung von sog. „effektiver Information“ (engl. “effective information”) ei , anhand eines Systems von drei verbundenen Zustandsübergängen in Form von AND-Gattern, vom Zustand $x_0=110$ zum Zeitpunkt '0' zum Zustand $x_1=001$ zum Zeitpunkt '1'. Das a priori Repertoire besteht aus den $2^3 = 8$ möglichen (Ausgabe-)Konfigurationen der Systemelemente, die mit gleicher Wahrscheinlichkeitsverteilung auftreten können. Die mit einem kausalen Mechanismus (dunkelrot) ausgestattete Systemarchitektur spezifiziert dann, daß der Zustand '110' die eindeutige Ursache des Zustands x_1 ist, so daß das a posteriori Repertoire dem Zustand '110' die Wahrscheinlichkeit '1' zuweist, und '0' den anderen Zuständen. M.a.W., indem eine von acht möglichen Konfigurationen vom Systemmechanismus als eine Ursache des gegenwärtigen Zustands bestimmt worden ist, und die anderen 7 Konfigurationen als Ursache ausgeschlossen worden sind, wird, indem die Unbestimmtheit reduziert wird, (effektive) Information erzeugt (in Anlehnung an D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 3).

910 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 4.

911 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. PP. 4, 5: “(...) which represents the natural decomposition of the system into parts.

(...)

(...) for any system, we need to find the informational ‘weakest link’, i.e. the decomposition into those parts that are most independent (least integrated). This weakest link is given by the minimum information partition P^{MIP} (...).”

Damit kann man diejenigen Untermengen (engl. "subset") S eines Systems X identifizieren, die das Vermögen besitzen um Information zu integrieren, u.z. den sog. „(Haupt-)Komplex“ (engl. "(main) complex") gemäß⁹¹²:

$$S \subset X \text{ ist ein Komplex gdw. } \left\{ \begin{array}{l} \phi(s_1) > 0 \\ \phi(t_1) \leq \phi(s_1) \text{ für alle } T \supset S \end{array} \right\} \quad (66)$$

$$S \subset X \text{ ist ein Hauptkomplex gdw. } \left\{ \begin{array}{l} S \text{ ist ein Komplex} \\ \phi(r_1) < \phi(s_1) \text{ für alle } R \subset S \end{array} \right\}, \quad (67)$$

wobei r_1, s_1 und t_1 Zustände bezeichnen.

4.3.01.3 DYNAMIC CORE HYPOTHESIS (DCH) NACH G.M. EDELMAN UND G. TONONI

Die sog. „Dynamic Core Hypothesis (DCH)“ nach G.M. EDELMAN und G. TONONI⁹¹³ besagt, daß die neuronale Dynamik einer sog. „reentranten“⁹¹⁴ Prozeßorganisation⁹¹⁵ (engl. "Reentry"⁹¹⁶) des thalamokortikalen Systems, d.h. der Synchronisation der neurophysiologischen Aktivität zwischen Gruppen von neuronalen (Sub-)Populationen in verschiedenen (sub-)kortikalen Arealen, als der fundamentale Mechanismus der neuronalen Integration und Differentiation bzw. Segregation zu betrachten sei⁹¹⁷, sodaß diese Aktivität (nur) einer der daran beteiligten Neuronengruppen, wenn sie dadurch Teil eines weiträumig organisierten sog. „funktionalen Clusters“ (engl. "functional cluster")⁹¹⁸ ist, und über einen Zeitraum von einigen hundert Millisekunden mit einer Reihe von anderen Neuronengruppen über starke gegenseitige Wechselwirkungen in Austausch steht, unmittelbar zur Entstehung und Aufrechterhaltung von bewußtem Erleben beitragen kann. Dies setzt dabei voraus, daß solch ein – als neuraler Prozeß aufgefaßter – funktionaler Cluster, den G.M. EDELMAN und G. TONONI⁹¹⁹ als „flexibles“ oder

912 S. D. BALDUZZI / G. TONONI: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PLoS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091. P. 7: "At each instant in time any system of elements can be decomposed into its constituent complexes, which form its fundamental units. Indeed, only a complex can be properly considered to form a single entity. For a complex, and only for a complex, it is meaningful to say that, when it enters a particular state out of its repertoire, it generates an amount of integrated information corresponding to its ϕ value."

913 Eingehend s. z.B. G. TONONI / G.M. EDELMAN: Consciousness and Complexity. Science. Vol. 282. 1998. PP. 1846-51.

Einführend hierzu s. z.B. G.M. EDELMAN / G. TONONI: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 154, 190-211.

914 S. Fn. 883.

915 S. Fn. 884.

916 S. Fn. 885.

917 S. z.B. G. TONONI / G.M. EDELMAN: Consciousness and the Integration of Information in the Brain. In: H.H. JASPER / L. DESCARRIES / V.F. CASTELLUCCI / S. ROSSIGNOL (Eds.): Consciousness. At the Frontiers of Neuroscience. Plenum Press. New York. 1998. PP. 258-61.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.3.01.1.

918 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.3.01.10 und 4.3.01.11.

919 Eingehend s. z.B. G. TONONI / G.M. EDELMAN: Consciousness and the Integration of Information

„dynamisches Kerngefüge“ (engl. “dynamic core”) bezeichnen, sowohl hoch differenziert ist, was sich in dessen hohem Komplexitätsniveau ausdrückt⁹²⁰, als auch – trotz seiner sich laufend ändernden Zusammensetzung – hoch integriert ist⁹²¹, und zum großen Teil im thalamokortikalen System⁹²² erzeugt wird.

in the Brain. In: H.H. JASPER / L. DESCARRIES / V.F. CASTELLUCCI / S. ROSSIGNOL (Eds.): Consciousness. At the Frontiers of Neuroscience. Plenum Press. New York. 1998. PP. 245-79, v.a. PP. 267-72, 272-75, 275-77.

Einführend hierzu s. z.B. G.M. EDELMAN / G. TONONI: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002. S. 195-98, v.a. S. 197.

920 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.3.01.12.

921 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.3.01.11.

922 S. Fn. 879.

4.3.02 HARMONY THEORY NACH P. SMOLENSKY⁹²³

4.3.02.0 Basierend auf der Dynamischen Systemtheorie⁹²⁴, der entropiebasierten Informationstheorie und der Wahrscheinlichkeitstheorie⁹²⁵ wird nun von dem U.S.-amerikanischen Physiker Paul SMOLENSKY⁹²⁶ in grundlegender Weise in seinem Artikel: "INFORMATION PROCESSING IN DYNAMICAL SYSTEMS: FOUNDATIONS OF HARMONY THEORY"⁹²⁷ im Jahr 1986 und in verschiedenen anderen Publikationen⁹²⁸ die sog. „Harmonietheorie“ (engl. "harmony theory")⁹²⁹ eingeführt, eine mathematische Theorie, die verschiedene kognitive Phänomene in P. SMOLENSKY's sog. „Subsymbolischen Paradigma“ (engl. "subsymbolic paradigm")⁹³⁰, deren fundamentale Prinzipien sie enthält, auszudrücken vermag.

4.3.02.1 Die mathematische Struktur der Harmonietheorie gründet sich dabei auf die Theorie des sog. „Schemas“ (engl. "schema (theory)") oder des sog. „Skripts“ (engl. "script") in der kognitiven Psychologie und der Kogni-

923 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des Kapitels 5.61 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. 2006, 2009.

924 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.2.

925 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.1.

926 Zur Person Paul SMOLENSKY's siehe die Website <http://www.cog.jhu.edu/faculty/smolensky/>.

927 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 194-281.

928 S. z.B. P. SMOLENSKY: Harmony Theory: Thermal Parallel Models in a Computational Context. In: P. SMOLENSKY / M.S. RILEY (Eds.): Harmony Theory: Problem Solving, Parallel Cognitive Models, and Thermal Physics. Technical Report 8404. Institute for Cognitive Science. University of California. San Diego. 1984. PP. 1-12 – P. SMOLENSKY: The Mathematical Role of Self-Consistency in Parallel Computation. In: P. SMOLENSKY / M.S. RILEY (Eds.): Harmony Theory: Problem Solving, Parallel Cognitive Models, and Thermal Physics. Technical Report 8404. Institute for Cognitive Science. University of California. San Diego. 1984. PP. 1-6 – P. SMOLENSKY: Formal Modeling of Subsymbolic Processes: An Introduction to Harmony Theory. In: N.E. SHARKEY (Ed.): Directions in the Science of Cognition. Ellis Horwood. 1986. PP. 204-35 – A. PRINCE / P. SMOLENSKY: Notes on Connectionism and Harmony Theory in Linguistics. Technical Report CU-CS-533-91. Department of Computer Science. Univ. of Colorado. Boulder. 1991 – P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. PP. 250-54 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 15-17, 74-77, 207-32, 345-90.

929 Die sog. „Harmonietheorie“ (engl. "harmony theory") steht dabei in engem Zusammenhang mit P. SMOLENSKY's sog. "Integrated Connectionist / Symbolic (ICS) Cognitive Architecture". Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.

Einführend s. z.B. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. P. 103.

930 Zum sog. „Subsymbolischen Paradigma“ (engl. "subsymbolic paradigm") nach P. SMOLENSKY s. z.B. H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kpt. 5.1, 5.2. BoD-Verlag, Norderstedt. 2006, 2009. S. 25-34.

tionswissenschaft⁹³¹, womit man eine kategoriale oder konzeptuelle Wissensstruktur über eine Klasse von Gegenständen, Sachverhalten oder Ereignissen abbilden kann. Damit ein kognitives System zu einem bestimmten Grad an Flexibilität befähigt ist, ist nun nach P. SMOLENSKY⁹³² anzunehmen, daß auf der Mikroebene seine Wissensgrundlage, i.S. der Vorstellung von sog. „Gedächtnisspuren“ (engl. "memory traces")⁹³³, aus einer Menge an sog. „Wissensatomen“ (engl. "knowledge atoms")⁹³⁴, oder besser: „vektoriellen Informationsatomen“, besteht, die auf der Makroebene im Rahmen einer dynamischen Konstruktion von sog. „Skripten“ (engl. "scripts") i.S. von R.C. SCHANK und R. ABELSON⁹³⁵ sich selbst aktiv und dynamisch zu, auf den betreffenden Kontext zugeschnittenen, Skripten konfigurieren, m.a.W.: anhand der Aktivierung von gespeicherten elementaren (Schema-)Konstituenten in Form von vektoriellen Informationsatomen im Rahmen von Wahrnehmungsvorgängen werden (Mikro-)Inferenzprozesse ausgeführt, die dazu führen, daß sich diese Atome aktiv und dynamisch zu kohärenten und kontext-sensitiven Schemata i.S.v. J.A. FELDMAN⁹³⁶, M. MINSKY⁹³⁷ und D.E. RUMELHART⁹³⁸ verbinden. Dar-

931 S. z.B. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 201-203.

Einführend zum Begriff des sog. „Schemas“ (engl. "schema") oder des sog. „Skripten“ (engl. "script") in der kognitiven und Entwicklungspsychologie sowie der Kognitionswissenschaft, z.B. bei Fr. BARTLETT, R.C. ANDERSON, J. PIAGET, W.F. BREWER, E. ROSCH, G.H. BOWER oder R.P. ABELSON, s. z.B. J.R. ANDERSON: Kognitive Psychologie. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1996. S. 150-63, 213-15 – H.M. TRAUTNER: Lehrbuch der Entwicklungspsychologie. Bd. 2: Theorien und Befunde. 2. Aufl. Hogrefe. Göttingen u.a. 1991. S. 162-68 – P. MILLER: Theorien der Entwicklungspsychologie. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1993. S. 52, 58, 77-83. Siehe hierzu auch Fn. 935 und 936.

932 S. z.B. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 199-206.

933 S. z.B. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 202.

934 Der Begriff des sog. „vektoriellen Informationsatoms“ ist m.E. dem des, von P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 203 verwendeten, „Wissensatoms“ (engl. "knowledge atoms") vorzuziehen, da der Begriff „Wissen“ in Verbindung mit der Theorie der künstlichen Neuronalen Netze zu „anthropomorph“ klingt.

935 Unter einem sog. „Skript“ (engl. "scripts") versteht man nach R.C. SCHANK / R. ABELSON: Scripts, Plans, Goals and Understanding. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1977. PP. 36-68 ein konzeptuelles Schema, mit dem sich prototypische Ereignisse darstellen lassen, z.B. der Besuch eines Restaurants oder Kinos.

936 Unter einem sog. „Schema“ (engl. "schema") versteht man nach J.A. FELDMAN: A Connectionist Model of Visual Memory. In: G.E. HINTON / J.A. ANDERSON (Eds.): Parallel Models of Associative Memory. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989. P. 64 eine aus der Informatik stammende Repräsentationsform, die kategoriales oder konzeptuelles Wissen in Form einer Struktur von Leerstellen repräsentiert, indem man Zuweisungen von Ausprägungen zu Eigenschaften des Begriffs vornimmt, z.B. ergibt sich die folgende Schemarepräsentation für den Begriff „Haus“: Oberbegriff: Gebäu-

aus ergibt sich nach P. SMOLENSKY⁹³⁹ das sog. „Harmonieprinzip“ (engl. „harmony principle“): „Das kognitive System ist eine Maschine (engl. „engine“) zur Aktivierung von kohärenten Verbänden (engl. „assembly“)⁹⁴⁰ von Atomen und vollzogenen Schlußfolgerungen, wobei „die Unterverbände (engl. „subassemblies“) von aktivierten Atomen, die dazu tendieren, exakt oder approximativ wiederaufzutreten, die Schemata darstellen“, die somit die statistischen Strukturrelationen der sensorischen Information kodieren. Dieses Prinzip richtet nach P. SMOLENSKY somit die Aufmerksamkeit auf den Begriff der sog. „Kohärenz“ (engl. „coherence“)⁹⁴¹ bzw. den der sog. „Konsistenz“ (engl. „consistence“)⁹⁴², m.a.W. es wird die Informationsstruktur bevorzugt, die „optimal harmonikal“ ist, d.h. die die wenigsten Beschränkungen (engl. „constraints“)⁹⁴³, bestehend aus dem bereits erzeugten „Wissen“ des Netzwerks, verletzt. Ein Informationsatom, z.B. ein sog. „Digraph“ (engl. „digraph“)⁹⁴⁴, wird dabei anhand des Vektors eines Neurons repräsentiert, der

de / Teile: Zimmer / Material: Holz, Stein usw.

937 S. z.B. M. MINSKY: A Framework for Representing Knowledge. In: P.H. WINSTON (Ed.): The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill. 1975. PP. 211-77.

938 S. z.B. D.E. RUMELHART: Schemata: The Building Blocks of Cognition. In: R.J. SPIRO / B.C. BRUCE / W.F. BREWER (Eds.): Theoretical Issues in Reading Comprehension. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1980. PP. 33-58.

939 S. z.B. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 203.

940 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.24.03, 3.423.

941 Zum Begriff der sog. „Kohärenz“ (engl. „coherence“) im Konnektionismus im allgemeinen und bei P. SMOLENSKY siehe auch die Ausführungen in Kap. 2.231, 2.232, 4.22, 4.24, 5.1.01.232.

942 Unter dem Begriff der sog. „Konsistenz“ (engl. „consistence“) versteht man in der Mathematik und der (mathematischen) Logik die Eigenschaft eines Axiomensystems, z.B. eines Logikkalküls, wenn es nachweislich keine Widersprüche enthält (sog. „Widerspruchsfreiheit“ (engl. „consistency“)), wohingegen bei P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 203 der Begriff der sog. „Konsistenz“ (engl. „consistence“) im Rahmen der Theorie der künstlichen neuronalen Netze, die keine „harten“ Widersprüche kennt, m.E. wohl eher im Sinne der „weichen“ Erfüllung von (möglichst vielen) Randbedingungen zu verstehen ist, m.a.W. wenn eine Wertezuweisung an die Variablen, die den Neuronen(-vektoren) entsprechen, eine Lösung des sog. „Constraint-Erfüllungsproblems“ (engl. „Constraint Satisfaction Problem (CSP)“) für ein Constraint-Netz besitzt.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.231, 2.232, 4.22, 4.24, 5.1.01.232 und H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kpt. 5.62. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 78-86.

943 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.22.

944 Unter einem sog. „Digraph“ (engl. „digraph“) versteht P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 205 eine Verbindung von zwei Buchstaben zu einer Silbe, z.B. 'WA', die anhand eines Vektors des Neurons repräsentiert wird, der die Silbe 'WA' kodiert, indem die Vektorkomponenten des Vektors aktiviert sind, die die betreffenden einzelnen Buchstaben, z.B. 'W' und 'A' repräsentieren und die übrigen Vektorkomponenten, die die anderen Buchstaben repräsentieren würden, deaktiviert sind.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.3.02.4.

eine (Mikro-)Eigenschaft (engl. "(micro-)feature") kodiert, die ein sehr kleines Bruchstück (engl. "fragment") des Wahrnehmungs- oder Aufgabenbereichs ausmacht, mit dem sich das kognitive System beschäftigt.

Von der Abstraktion von typischen Attributen einer Kategorie, d.h. entweder einer Objekt- oder einer Episodenrepräsentation i.S. eines Schemas oder eines Skripts anhand der Belegung von Merkmalen durch ihre Merkmalsausprägungen, gelangt P. SMOLENSKY⁹⁴⁵ in seinem Artikel danach zur wahrscheinlichkeits-theoretischen Formulierung der Schematheorie:

*"Each schema encodes the statistical relations among a few representational features. During inference, the probabilistic information in many active schemata are dynamically folded together to find the most probable state of the environment."*⁹⁴⁶

Um sich dem Grad an kognitiver Flexibilität anzunähern, der sich im Handeln und Verhalten des Menschen zeigt, hat man deshalb zur Beschreibung der Informationsatome auf der Mikroebene zurückzukehren, die die Elemente der kognitiven Komputation darstellen, und nicht die Schemata und Skripte, sodaß das Problem der Modellierung von Schemata und Skripten subsumiert wird unter das Problem der Modellierung von vektoriellen Informationsatomen, wobei dies dadurch gelöst wird, indem die Harmoniefunktion, das Maß der Selbstkonsistenz eines künstlichen neuronalen Netzwerks, entwickelt wird.

4.3.02.2 Ein zentraler kognitiver Prozeß besteht nun nach P. SMOLENSKY⁹⁴⁷ darin, daß ein kognitiver Zustand hergestellt wird, der „maximal selbstkonsistent“ (engl. "maximally self-consistent") ist, wobei „der Selbstkonsistenz eines möglichen Zustands eines kognitiven Systems der Wert einer sog. „Harmoniefunktion“ (engl. "harmony function") H zugeordnet werden kann“: Ein Zustand des Systems ist definiert durch zwei Schichten von Neuronen⁹⁴⁸, u.z. besteht die zweite Schicht aus einer Menge von Informationsatomen, anhand derer das System seine Umgebung interpretiert, und einem dazugehörigen sog. „Aktivierungsvektor“ (engl. "activation vector"), der angibt, ob das Informationsatom aktiviert oder deaktiviert ist. Die Harmonie eines solchen Zustandes ist nun die Summe der aktiven Informationsatome, gewichtet anhand der „Stärke“ (engl. "strength")⁹⁴⁹ der Verbindung des betreffenden Informations-

945 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 209-10.

946 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 210.

947 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 208.

948 Siehe hierzu die Ausführungen in Fn. 962.

949 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the

atoms zu den Eingangsknoten in der ersten Schicht, die die zu repräsentierenden Eigenschaften kodieren. Jedes (Verbindungs-)Gewicht (engl. "weight")⁹⁵⁰ multipliziert die Selbstkonsistenz zwischen dem betreffenden Vektor des Informationsatoms und dem Vektor, bestehend aus den Werten der zu repräsentierenden Eigenschaften des Eingabemusters. Die Selbstkonsistenz besteht nun in der Ähnlichkeit (engl. "similarity") zwischen dem Vektor des Informationsatoms, dem sog. „Wissens- oder Informationsvektor“ (engl. "knowledge vector"), bestehend aus den Eigenschaften, die das Informationsatom definieren, d.h. dem Vektor, bestehend aus den Verbindungen zu den Eingangsknoten der ersten Schicht, und dem sog. „repräsentationalen Eigenschafts-“ oder „Attributsvektor“ (engl. "representational feature vector"), der in Form der Eingangsmuster die Eigenschaften der Systemumgebung kodiert, auch sog. „Repräsentationsvektor“ (engl. "representation vector") genannt (s. Graphik.29).

4.3.02.3 Die Harmonietheorie in ihrer mathematischen Form⁹⁵¹ wird von P. SMOLENSKY⁹⁵² wie folgt dargelegt:

Zuerst wird der Repräsentationsvektor definiert:

„At the center of any harmony theoretic model of a particular cognitive process is a set of *representational features* r_1, r_2, \dots . These features constitute the cognitive system's representation of possible states of the environment with which it deals. (...)

A *representational state* of the cognitive system is determined by a collection of values for all the representational variables $\{r_i\}$. This collection can be designated by a list or vector of +'s and -'s: the representation vector \mathbf{r} .“⁹⁵³

Danach werden der Wissens- oder Informationsvektor und der Aktivierungsvektor definiert:

“The representational features serve as a blackboard on which the cognitive system carries out its computations. The *knowledge* that guides those computations is associated with the second set of entities, the knowledge atoms. Each such atom α is characterized by a knowledge vector \mathbf{k}_α ,

Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 208, 215.

950 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.212.

951 Eine Einführung bietet z.B. J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 195-96.

952 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 213-23.

Einführend s. z.B. A. GRAUEL: Neuronale Netze. Grundlagen und mathematische Modellierung. BI Wissenschaftsverlag. Mannheim u.a. 1992. S. 143-53.

953 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 213-14.

which is a list of +1, -1 and 0 values, one for each representation variable r_i . This list encodes a piece of knowledge that specifies what value each r_i should have: +1, -1, or unspecified (0).

Associated with knowledge atom α is its *activation variable*, a_α . This variable will also be taken to be binary: 1 will denote active; 0, inactive. (...) The list of $\{0,1\}$ values for the activations $\{a_\alpha\}$ comprises the *activation vector* \mathbf{a}_α .

Knowledge atoms encode subpatterns of feature values that occur in the environment. The different frequencies with which various such patterns occur is encoded in the set of strengths, $\{\sigma_\alpha\}$, of the atoms."⁹⁵⁴

Zum Schluß wird die Harmoniefunktion definiert und ihr Bezug zur Wahrscheinlichkeitstheorie hergestellt:

"A state of the cognitive system is determined by the values of the lower and upper level nodes. Such a state is determined by a pair (\mathbf{r}, \mathbf{a}) consisting of a representation vector \mathbf{r} and an activation vector \mathbf{a} . A harmony function assigns a real number $H_K(\mathbf{r}, \mathbf{a})$ to each such state. The harmony function has as parameters the set of knowledge vectors and their strengths:

$\{(\mathbf{k}_\alpha, \sigma_\alpha)\}$; I will call this the *knowledge base* \mathbf{K} .

(...)

The harmony function⁹⁵⁵ (...) is

$$H_K(\mathbf{r}, \mathbf{a}) = \sum_{\alpha} \sigma_{\alpha} a_{\alpha} h_K(\mathbf{r}, \mathbf{k}_{\alpha}). \quad (68)$$

Here, $h_K(\mathbf{r}, \mathbf{k}_{\alpha})$ is the harmony contributed by activating atom α , given the current representation \mathbf{r} . I have taken this to be

$$h_K(\mathbf{r}, \mathbf{k}_{\alpha}) = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_{\alpha}}{|\mathbf{k}_{\alpha}|} - \kappa. \quad (69)$$

The vector inner product⁹⁵⁶ (...) is defined by

954 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 215-16.

955 Ein einfaches Fallbeispiel zur Harmoniefunktion wird erläutert in P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. PP. 250-52. Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.232.

956 Zum sog. „inneren Produkt“ („Skalarprodukt“) s. z.B. M.-B. KALLENRODE: Rechenmethoden der Physik. Mathematischer Begleiter zur Experimentalphysik. 2. Aufl. Springer Verl. Berlin u.a. 2005. S. 15-18.

In kartesischen Koordinaten läßt sich das innere Produkt von zwei Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} wie folgt berechnen:

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_a = \sum_i r_i (\mathbf{k}_a)_i \quad (70)$$

and the norm (...) is defined by

$$|\mathbf{k}_a| = \sum_i |(\mathbf{k}_a)_i|. \quad {}^{957} \quad (71)$$

Die Beziehung zwischen der Harmoniefunktion und der Wahrscheinlichkeitstheorie stellt sich nach P. SMOLENSKY⁹⁵⁸ wie folgt dar:

“(...) schemata are collections of knowledge atoms that become active in order to maximize harmony, and inferences are also drawn to maximize harmony. This suggests that the probability of a possible state of the environment is estimated by computing its harmony: the higher the harmony, the greater the probability.

(...)

The relationship between the harmony function H and estimated probabilities is of the form

$$\text{probability} \propto e^{H/T} \quad (72)$$

where T is some constant that cannot be determined a priori.

This relationship between probability and harmony is mathematically identical to the relationship between probability and (minus) energy in statistical physics: the Gibbs or Boltzmann law. This is the basis of the isomorphism between cognition and physics exploited by harmony theory. In statistical physics, H is called the *Hamiltonian function*; it measures the energy of a state of a physical system. In physics, T is the *temperature* of the system. In harmony theory, T is called the *computational temperature*⁹⁵⁹ of the cognitive system. When the temperature is very high, completions with high harmony are assigned estimated probabilities that are only slightly higher than those assigned to low harmony completions; the environment is treated as more random in the sense that all completions are estimated to have roughly

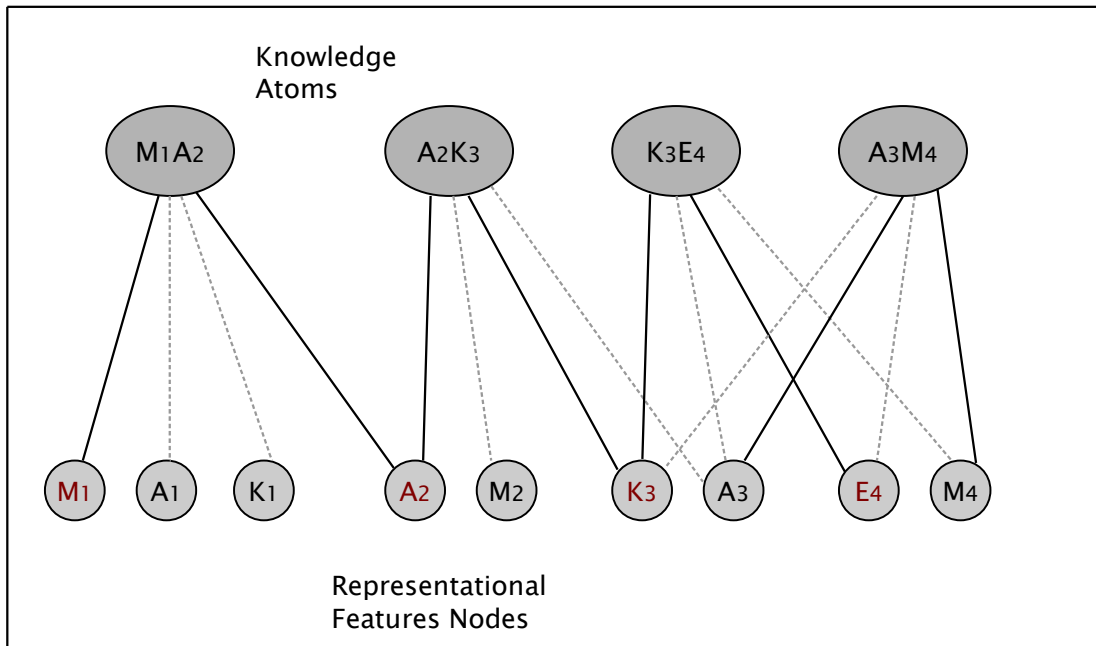
$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z, \quad (73)$$

d.h. die Vektorkomponenten des Vektors \mathbf{a} werden mit den entsprechenden Vektorkomponenten des Vektors \mathbf{b} multipliziert, wobei c eine Zahl (Skalar) ist.

957 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 220-22.

958 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 210-13.

959 Siehe hierzu im einzelnen P. SMOLENSKY: Schema Selection and Stochastic Inference in Modular Environments. Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence. Washington/DC. August 22-26, 1983. Washington/DC. 1983. PP. 378-82.



Graphik.29: Schematische Darstellung der (Wahrnehmungs-)Ergänzungsaufgabe (engl. "(perceptual) completion task"): Die Aufgabe besteht darin, das zum Teil verdeckte Wort 'MAKE' richtig wiederzugeben, wobei die erste Knotenschicht eine Aufeinanderfolge der zu erkennenden Buchstaben beinhaltet, und die zweite Knotenschicht die sog. „Wissensatome“ (engl. "knowledge atoms"), die jeweils eine Abfolge von zwei Buchstaben repräsentieren können, z.B. die Digraphe 'M₁A₂', 'A₂K₃', 'K₃E₄' und 'A₃M₄', wobei die Indizes die Position eines Buchstaben angeben, die er im zu erkennenden Wort einnimmt. Wenn also z.B. der erste Buchstabe im Wort ein 'M' und der zweite ein 'A' ist, wird sich dann ein Höchstmaß an Übereinstimmung mit dem Wissensatom ergeben, dessen Buchstabenabfolge 'M₁A₂' jener Abfolge am besten entspricht, weshalb das Atom positive Verbindungsgewichte zu den repräsentationalen Eigenschaftsknoten (engl. "representational feature nodes") der ersten Schicht aufweisen wird, die diese Buchstabenabfolge kodieren (durchgezogene Linien). Ein bestimmter Wissensvektor, der hier das Wort 'MAKE' kodieren soll, wird dadurch erzeugt, indem das Netzwerk einen Teil dieses Vektors als Eingabe erhält, hier z.B. den Eigenschaftsvektor, der die Buchstabenabfolge 'M₁' und 'A₂' kodiert, und das Netzwerk dann diesen Vektor hin zum gesuchten Wissensvektor ergänzt, indem alle Verbindungsgewichte gleichzeitig zusammenwirken, u.z. derart, daß der Zustand des Netzwerks gefunden wird, der am besten zur gegebenen Eingabe paßt, d.h. in diesem Fall werden z.B. die Wissensatome 'A₂K₃' und 'K₃E₄' am meisten aktiviert werden – im Gegensatz zum Wissensatom 'A₃M₄', da deren Buchstabenabfolge den höchsten Grad an Konsistenz mit der zum Teil verdeckten Eingabe und dem bereits erzeugten Wissensvektor 'M₁A₂' herstellt, m.a.W. die betreffenden Wissens- und Eigenschaftsvektoren das höchste Maß an Übereinstimmung erzeugen werden (angelehnt an P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 204, 205, 207, 216).

equal probability. When the temperature is very low, only the completions with highest harmony are given nonnegligible estimated probabilities."⁹⁶⁰

960 S. P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 210-12.

4.3.02.4 Im Rahmen einer (Wahrnehmungs-)Ergänzungsaufgabe (engl. „(perceptual) completion task“) nach P.H. LINDSAY und D.A. NORMAN⁹⁶¹ besteht die Harmonietheorie nach P. SMOLENSKY⁹⁶² darin, daß die Aktivierung der Informationsatome und deren Inferenzprozesse sich wechselseitig derart beschränken (engl. “constrain”)⁹⁶³, daß die Unterverbände von Schemata, die sich durch die Aktivierung von Informationsatomen konstituieren, und die Inferenzprozesse, die die fehlenden Teile der Schemarepräsentation im Rahmen einer Wahrscheinlichkeitsschätzung ergänzen, dadurch erreicht werden, daß die maximalen selbstkonsistenten Zustände des Systems gefunden werden, die ebenfalls wiederum mit den sensorischen Informationen konsistent sind (s. Graphik.29).

961 S. P.H. LINDSAY / D.A. NORMAN: Human Information Processing. An Introduction to Psychology. Second Edition. Academic Press. New York, San Francisco, London. (1972) 1977. PP. 284-85.

962 Ein Fallbeispiel einer Ergänzungsaufgabe wird in P. SMOLENSKY: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 206-208, 211-13 und in P. SMOLENSKY: Formal Modeling of Subsymbolic Processes: An Introduction to Harmony Theory. In: N.E. SHARKEY (Ed.): Directions in the Science of Cognition. Ellis Horwood. 1986. PP. 212-14 beschrieben.

Ein anderes Anwendungsbeispiel zum OHM'schen Gesetz findet sich z.B. in M.S. RILEY / P. SMOLENSKY: A Parallel Model of (Sequential) Problem Solving. In: P. SMOLENSKY / M.S. RILEY (Eds.): Harmony Theory: Problem Solving, Parallel Cognitive Models, and Thermal Physics. Technical Report 8404. Institute for Cognitive Science. University of California. San Diego. 1984. PP. 1-9.

963 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.22, Fn. 793, 794.

4.3.03 FREE-ENERGY PRINCIPLE NACH K. FRISTON

4.3.03.0 Unter dem sog. „Prinzip der freien Energie“ (engl. “Free-Energy Principle”)⁹⁶⁴ des britischen Mediziners und Neurowissenschaftlers Karl FRISTON⁹⁶⁵ versteht man, allgemeinverständlich umschrieben, ein informationstheoretisches Maß, das besagt, daß jede adaptive Veränderung in einem selbstorganisierten System zu einer Minimierung der sog. „freien Energie“ (engl. “free energy”)⁹⁶⁶ führt, d.h., daß es die sog. „Entropie“ (engl. “entropy”)⁹⁶⁷

964 Grundlegend s. z.B. K. FRISTON / KI.E. STEPHAN: Free-Energy and the Brain. Synthese. Vol. 159. 2007. PP. 417-58, v.a. PP. 424-34 – K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 13. 2009. PP. 293-301, v.a. P. 294 – K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. Nature Reviews Neuroscience. Vol. 11. 2010. PP. 127-38, v.a. P. 128 – K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. PP. 70-87, v.a. PP. 73-75.

Eingehend s. z.B. K.J. FRISTON / N. TRUJILLO-BARRETO / J. DAUNIZEAU: DEM: A Variational Treatment of Dynamic Systems. NeuroImage. Vol. 41. 2008. PP. 849-85 – K. FRISTON / KI.E. STEPHAN / St. KIEBEL: Free-Energy, Value and Neuronal Systems. In: D. HEINKE / E. MAVRITSAKI (Eds.): Computational Modelling in Behavioural Neuroscience. Closing the Gap between Neurophysiology and Behaviour. Psychology Press. Hove. 2009. PP. 266-302, v.a. PP. 277-81 – K. FRISTON: Is the Free-Energy Principle Neurocentric? Nature Reviews Neuroscience. Vol. 11. 2010. P. 605 – K. FRISTON / P. AO: Free-Energy, Value and Attractors. Computational and Mathematical Methods in Medicine. Vol. 2012. PP. 1-27 – K. FRISTON: The History of the Future of the Bayesian Brain. NeuroImage. Vol. 62. 2012. PP. 1230-33.

Zum Verhältnis des Free-Energy Principle zur sog. “LYAPUNOV function” und zur sog. “Harmony Theory” i.S.v. P. SMOLENSKY s. z.B. K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. P. 71.

Mit Bezug auf die “correlation theory of brain function” nach Chr. von der MALSBERG und die “Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis” nach W. SINGER et al. s. z.B. K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. Nature Reviews Neuroscience. Vol. 11. 2010. PP. 132-33.

965 Zur Person Karl FRISTON's siehe die Websites <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/~karl/> und <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/Friston/>.

966 Die sog. „freie Energie“ (engl. “free energy”) F , auch HELMHOLTZ-Funktion (engl. “Helmholtz free energy”) genannt, ist dabei wie folgt definiert mit:

$$F = E - TS, \quad (74)$$

wobei E die (innere) (Gesamt-)Energie des Systems bezeichnet, T die absolute Temperatur und S die (statistische) Entropie.

Einführend zum Begriff der sog. „freien Energie“ (engl. “free energy”) in der statistischen Mechanik s. z.B. Fr. SCHWABL: Statistische Mechanik. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006. S. 58-60, v.a. S. 59, S. 77 – Chr. GERTHSEN: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999. S. 934-35, 938-40, v.a. S. 939 – W.J. MOORE: Grundlagen der Physikalischen Chemie. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1990. S. 163-64.

S. auch D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 125-30, v.a. P. 127 – B. MÜLLER / J. REINHARDT / M.T. STRICKLAND: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995. PP. 191-94, v.a. P. 193.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.10, Fn. 731.

967 S. z.B. K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. Nature Reviews Neuroscience. Vol. 11. 2010. P. 127: “Entropy is also the average self information or ‘surprise’.”

(...)

“Entropy

The average surprise of outcomes sampled from a probability distribution or density. A density with low entropy means that, on average, the outcome is relatively predictable. Entropy is

seiner sensorischen Informationszustände minimiert, sodaß es eine kleinere Anzahl von (neuronalen) Systemzuständen einnehmen kann, und dies dazu führt, daß unerwartete sensorische Daten mit einem geringeren Grad an Wahrscheinlichkeit auftreten.

4.3.03.1 Unter der Voraussetzung, daß die neuronal-sensorischen Informationsverarbeitungsprozesse mit statistischen Modellen i.S. Th. BAYES' anhand von Wahrscheinlichkeitsschätzungen beschrieben werden können (engl. "BAYESian Brain Hypothesis")⁹⁶⁸, sodaß das menschliche Gehirn als statistische Inferenz- oder HELMHOLTZ-Maschine (engl. "HELMHOLTZ Machine")⁹⁶⁹ interpretiert werden kann, stellt nach K. FRISTON⁹⁷⁰ eben das aus der statistischen Physik stammende quantitative Konzept der freien Energie ein informationstheoretisches Maß zur Verfügung, damit man in den Neurowissenschaften – anhand seines daraus verallgemeinerten Prinzips der Minimierung bzw. der Optimierung der freien Energie (engl. "minimisation or optimisation of free energy")⁹⁷¹ – die Tendenz eines selbstorganisierten biologischen

therefore a measure of uncertainty."

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.10, 4.11.

968 S. z.B. K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 11. 2010. PP. 129-31 – D.C. KNILL / A. POUGET: The Bayesian Brain: The Role of Uncertainty in Neural Coding and Computation. *Trends in Neurosciences*. Vol. 27. 2004. PP. 712-19, v.a. PP. 712-13 – K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 13. 2009. P. 294 – K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN / St. KIEBEL: Free-Energy, Value and Neuronal Systems. In: D. HEINKE / E. MAVRITSAKI (Eds.): *Computational Modelling in Behavioural Neuroscience. Closing the Gap between Neurophysiology and Behaviour*. Psychology Press. Hove. 2009. PP. 295-98.

969 S. z.B. P. DAYAN / G.E. HINTON / R.M. NEAL: The Helmholtz Machine. *Neural Computation*. Vol. 7. 1995. PP. 889-904, v.a. PP. 893-96 – P. DAYAN / G.E. HINTON: Varieties of Helmholtz Machines. *Neural Networks*. Vol. 9. 1996. PP. 1385-1403, v.a. PP. 1389-90.

Zum Verhältnis der epistemischen Position H. von HELMHOLTZ', insbesondere des Begriffes des „unbewussten Schließens“, zum BAYES Theorem s. z.B. G. WESTHEIMER: Was Helmholtz a Bayesian? *Perception*. Vol. 39. 2008. PP. 642-50, v.a. PP. 648-50.

S. auch W. STEGMÜLLER: *Personelle und Statistische Wahrscheinlichkeit. Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Teil IV. Erster Halbband: Personelle Wahrscheinlichkeit und Rationale Entscheidung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1973. S. 155-56, 296-98.

970 S. z.B. K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 13. 2009. P. 295: "We are open systems in exchange with the environment; the environment acts on us to produce sensory impressions and we act on the environment to change its states. This exchange rests upon sensory and effector organs (like photoreceptors and oculomotor muscles). If we change the environment or our relationship to it, sensory input changes. Therefore, action can reduce free-energy (i.e. prediction errors) by changing sensory input, whereas perception reduces free-energy by changing predictions."

(...)

"In summary, (i) agents resist a natural tendency to disorder by minimising a free-energy bound on surprise; (ii) this entails acting on the environment to avoid surprises, which (iii) rests on making Bayesian inferences about the world. In this view, the Bayesian brain ceases to be a hypothesis, it is mandated by the free-energy principle; free-energy is not used to finesse perception, perceptual inference is necessary to minimise free-energy (...). This provides a principled explanation for action and perception that serve jointly to suppress surprise or prediction error; (...)."

S. auch K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN: *Free-Energy and the Brain*. *Synthese*. Vol. 159. 2007. P. 419.

971 S. z.B. K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 11. 2010. PP. 128, 131-32 – K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN: *Free-Energy and the Brain*. *Synthese*. Vol. 159. 2007. P. 419 unter Hinweis auf K. FRISTON: *Learning and Inference in the Brain*.

Agenten als eines offenen Nichtgleichgewichts-Systems⁹⁷² gegenüber seiner Systemumgebung beschreiben kann, im Rahmen seiner Anpassung an bestimmte sich ständig verändernde Umgebungsbedingungen bestimmte angemessene, sinnvolle Ordnungszustände einzunehmen, indem er die freie Energie in Form von Voraussagefehlern (engl. "prediction errors") in Bezug auf Handlungs- und Wahrnehmungsleistungen vermindert oder unterdrückt. Dieser Begriff der freien Energie kann dabei verstanden werden als ein Maß, basierend auf (neuronalen) Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen i.S. von C.Fr. GAUSS⁹⁷³ und (stochastischen) Gradientenabstiegsmethoden⁹⁷⁴, die beschreiben, wie ein Agent – im engen Zusammenspiel von Handlungs- und Wahrnehmungsleistungen – implizite statistische Inferenzen vollzieht, um den Grad der Wahrscheinlichkeit der Auseinandersetzung mit unerwarteten, überraschenden Umgebungssachverhalten herabzusetzen, oder, umgekehrt, mit einem erhöhten Grad an Wahrscheinlichkeit die Voraussage von zukünftigen Umgebungsereignissen zutreffend vorzunehmen.

4.3.03.2 Die mathematische Definition der freien Energie F eines Systems, bestehend aus zwei Termen, u.z. der sog. „generativen Wahrscheinlichkeitsdichte“ (engl. "generative probability density") $p(\tilde{y}, \vartheta | \alpha)$ und der sog. „Ensemblewahrscheinlichkeitsdichte“ (engl. "ensemble probability density") $q(\vartheta; \lambda)$, lautet dabei nach K. FRISTON wie folgt⁹⁷⁵:

$$F(\tilde{y}, \lambda | \alpha) = \text{Energy} - \text{Entropie} = -\langle \ln p(\tilde{y}, \vartheta | \alpha) \rangle_q + \langle \ln q(\vartheta; \lambda) \rangle_q \quad (75)$$

wobei α die Handlungsvariable (engl. "action variable") ist, ϑ die Variable für die Umgebungsursachen (engl. "environmental causes"), \tilde{y} die Variable für die sensorischen Informationen (engl. "sensory input"), die anhand den Systemparametern λ enkodiert werden, wie z.B. anhand der neuronalen Aktivi-

Neural Networks. Vol. 16. 2003. PP. 1325-52 – K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. P. 71.

972 S. hierzu z.B. K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. PP. 71-72 – K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN: Free-Energy and the Brain. Synthese. Vol. 159. 2007. PP. 422-23.

S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 1.25.01.

973 Benannt nach dem Mathematiker, Astronomen, Geodät und Physiker Carl Friedrich GAUSS. Allgemein zur sog. „GAUSS-Verteilung“ (engl. "Gaussian distribution") s. z.B. E.Th. JAYNES: Probability Theory: The Logic of Science. 7th Ed. Cambridge University Press. Cambridge. 2010. PP. 198-242.

S. hierzu auch D. APPLEBAUM: Probability and Information: An Integrated Approach. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1996. PP. 147-51.

974 S. z.B. K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. PP. 70-87, v.a. PP. 71, 73, 75, 76, 79, 81, 85, 86 – K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN: Free-Energy and the Brain. Synthese. Vol. 159. 2007. PP. 420, 422, 425, 426, 430, 431, 436, 437, 439, 445 – K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 13. 2009. PP. 295, 296, 297, 300.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 4.23.

975 S. z.B. K. FRISTON / K.I.E. STEPHAN: Free-Energy and the Brain. Synthese. Vol. 159. 2007. PP. 425-26 – K. FRISTON / J. KILNER / L. HARRISON: A Free Energy Principle for the Brain. Journal of Physiology Paris. Vol. 100. 2006. P. 71 – K. FRISTON: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 13. 2009. P. 294.

tät, der Neuromodulation und den neuronalen Konnektionen, sodaß dadurch die freie Energie minimiert bzw. optimiert wird.

4.4 DIVERSE WAHRSCHEINLICHKEITSTHEORETISCHE (NEURO-)ARCHITEKTUREN UND ALGORITHMEN

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden auf zwei sehr bedeutende selbstorganisierte (Neuro-)Architekturen mit ihren entsprechenden Algorithmen eingegangen (Kap. 4.4.01, 4.4.02), die vor allem das Problem der Klassifikation von – mit wahrscheinlichkeitstheoretischer Methodik analysierbarer – Information im Konnektionismus in grundlegender Weise angegangen haben, indem sie jeweils einen sehr leistungsfähigen integrativen Klassifikationsmechanismus entwickelt haben, der es gestattet, anhand eines neurobiologisch sehr plausiblen, selbstorganisierten (Lern-)Algorithmus im Rahmen eines unüberwachten (Wettbewerbs-)Lernverfahrens die neuronale Bindung von – im Modell zumeist in vektorieller Form vorliegenden – Daten bzw. Informationen hin zu (allgemeinen) stabilen statistischen Prototypen und darauf aufbauenden Wahrscheinlichkeits-hypothesen angemessen zu modellieren.

4.4.01 SELF-ORGANIZING (FEATURE) MAP NACH T. KOHONEN⁹⁷⁶

4.4.01.0 Einen selbstorganisierten (Lern-)Algorithmus im Rahmen eines unüberwachten (Wettbewerbs-)Lernverfahrens (engl. "unsupervised competitive learning")⁹⁷⁷ verwendet die sog. „Selbstorganisierende (Merkmals-)Karte“ (engl. "Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)")⁹⁷⁸ des finnischen Ingenieurs Teuvo KOHONEN⁹⁷⁹, die auch als sog. „KOHONEN-Karte“ (engl. "KOHONEN map") bezeichnet wird. In ihrer grundlegenden Gestalt (engl. "The Basic SOM")⁹⁸⁰ erzeugt sie einen Ähnlichkeitsgraphen (engl. "similarity graph") aus Eingabedaten im Rahmen einer unüberwachten Klassifikation von Daten mit topologie- und verteilungserhaltenden Abbildungseigenschaften. Die KOHONEN-Karte bildet dabei die nichtlinearen statistischen Beziehungen zwischen hochdimensionalen Daten ab in einfache geometrische Beziehungen ihrer Bildpunkte auf ein niedrigdimensionales „Array“,

976 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des Kapitels 1. meiner Studienarbeit: H. Maurer: Die Architekturtypen des „Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)“ nach Teuvo Kohonen. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

977 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.213, 2.24, 4.2.

978 Grundlegend T. KOHONEN: Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*. Vol. 43. 1982. PP. 59-69, v.a. PP. 60-63 – T. KOHONEN: Analysis of a Simple Self-Organizing Process. *Biological Cybernetics*. Vol. 44. 1982. PP. 135-40, v.a. PP. 135-36 – T. KOHONEN: Clustering, Taxonomy, and Topological Maps of Patterns. *Proceedings of the 6th International Conference of Pattern Recognition*, Munich. IEEE Computer Society Press. Silver Spring/MD. 1982. PP. 114-28, v.a. PP. 117-19.

Eingehend hierzu s. z.B. T. KOHONEN: *Self-Organizing Maps*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. PP. 105-76, vor allem PP. 106-12 – T. KOHONEN: *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1995. PP. 77-129 – T. KOHONEN: *Self-Organizing and Associative Memory*. 2. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1988. PP. 119-57, vor allem PP. 130-33.

Einleitend hierzu s. z.B. T. KOHONEN: Overture. In: Seiffert, U. / Jain, L.C. (Eds.): *Self-Organizing Neural Networks: Recent Advances and Applications*. Physica-Verlag. Heidelberg, New York. 2002. PP. 2-3 – T. KOHONEN: The Self-Organizing Map. In E. OJA (Ed.): *Neurocomputing. Special Volume on Self-Organizing Maps*. Vol. 21. 1998. PP. 2-3.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: *Simulation Neuronaler Netze*. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 179-87 – H.-H. BOTHE: *Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 138-41 – S. HAYKIN: *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 443-83 – R. ROJAS: *Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 339-59, v.a. S. 343-46 – G.D. REY / K.F. WENDER: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 76-87 – A. SCHERER: *Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen*. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 93-107 – S. KNIELING: *Einführung in die Modellierung künstlich neuronaler Netzwerke*. WiKu-Verlag für Wissenschaft und Kultur. 2007. S. 59-70.

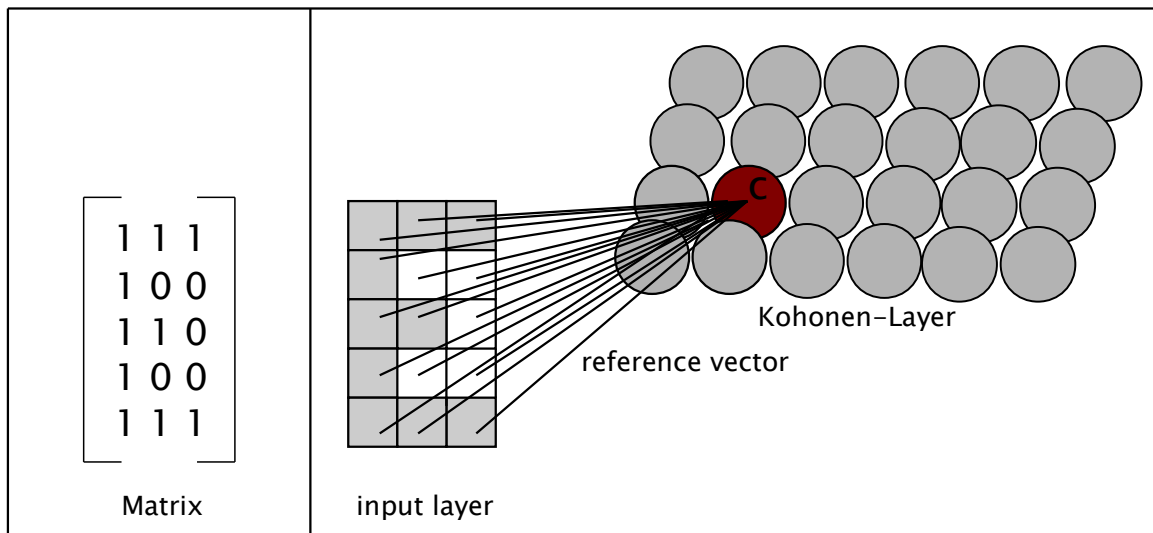
S. auch H. RITTER / Th. MARTINETZ / Kl. SCHULTEN: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*. Addison-Wesley Publishing Company. Bonn u.a. 1990. S. 51-68, v.a. S. 57-61 – N. KASABOV: *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 293-97 – M.M. VAN HULLE: *Faithful Representations and Topographic Maps – From Distortion- to Information-Based Self-Organization*. John Wiley, New York. 2000. PP. 15-36.

979 Zur Person Teuvo KOHONEN's siehe die Website <http://www.cis.hut.fi/research/som-research/teuvo.html>.

980 S. z.B. T. KOHONEN: *Self-Organizing Maps*. 3. Ed. Springer-Verl. Berlin u.a. 2001. PP. 105-109, 109-12.

gewöhnlich ein regelmäßiges zweidimensionales Gitter von Knoten.⁹⁸¹ T. KOHONEN selbst empfiehlt in der Regel „aus Gründen der besseren visuellen Inspektion“⁹⁸² eine hexagonale gegenüber einer quadratischen Gitterstruktur und eine rechteckige gegenüber einer quadratischen Gitterform.

4.4.01.1 Die Selbstorganisierende (Merkmals-)Karte besteht demnach in der Regel aus einer zweidimensionalen topologischen Anordnung von formalen Neuronen (s. Graphik.30), und jedes formale Neuron i stellt eine (Berechnungs-)Einheit dar, der ein n -dimensionaler sog. „Synapsen-“ oder „Referenzvektor“ (engl. „synapse vector“ oder „reference vector“) m_i zugeordnet ist, wobei die numerischen Vektorkomponenten zufällig belegt werden (sog. „Initialisierung“ (engl. „initialization“)). Alle Neuronen der Eingabe-



Graphik.30: Schematisches Diagramm einer Netzwerkarchitektur einer KOHONEN-Karte: Die KOHONEN-Schicht (engl. „KOHOEN-layer“) arbeitet im Rahmen der sog. „Gewinnerfunktion“ nach dem Prinzip des „Winner-Take-All (WTA)“, d.h. in Bezug auf jeden vorgegebenen Eingabevektor kann nur ein Neuron der KOHONEN-Schicht gewinnen, hier in Rot dargestellt. Illustriert sind auch die Verbindungen von jedem Eingabeneuron der Eingabeschicht (engl. „input layer“), dargestellt als eine Zelle der Eingabeschicht, zum gewinnenden Neuron. Die Eingabe besteht dabei in dem Buchstabe 'E' als ein Aktivitätsmuster bestehend aus 3 x 5 Eingabeneuronen. Im linken Graphiksegment ist der dazugehörige 3 x 5 dimensionale Eingabevektor in Matrixnotation angegeben, wobei ein dunkel (hell) gezeichnetes Eingabeneuron einer Vektorkomponente von 'Eins' ('Null') entspricht. Der Synapsen- bzw. Referenzvektor des gewinnenden Neurons käme nun – verglichen mit den anderen Neuronen der KOHONEN-Schicht – dieser Konfiguration der Komponenten des Eingabevektors noch am nächsten, und würde nun versuchen sich mit seinem ebenfalls 3 x 5 dimensional Synapsen- bzw. Referenzvektor diesem (Eingabe-)Vektor anzupassen, sodaß die Konfiguration seiner (Referenz-)Vektorkomponenten im Laufe des Trainings ebenfalls der vorgegebenen Matrix entsprechen würde (angelehnt an M. SPITZER: Geist im Netz. Modelle für Lernen, Denken und Handeln. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg, Berlin. 2000. S. 110. S. auch T. KOHONEN: Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. Biological Cybernetics. Vol. 43. 1982. P. 60).

981 S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verl. Berlin u.a. 2001. P. 106.

982 S. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 186.

schicht (engl. "input layer") sind mit allen Neuronen der Wettbewerbsschicht (engl. "competitive layer"), auch als sog. „KOHONEN-Schicht“ (engl. "KOHONEN layer") bezeichnet, durch Gewichtsvektoren verknüpft, d.h. alle Wettbewerbsneuronen empfangen die gleichen Eingabesignale, n -dimensionale Vektoren aus dem Eingabevektorraum V . Nun wählt man daraus entsprechend der sog. „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“ (engl. "probability density function")⁹⁸³ $w(x)$ einen zufälligen Vektor $x = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \in \mathbb{R}^n$, der mit allen Referenzvektoren $m_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}]^T \in \mathbb{R}^n$ verglichen wird (sog. „Stimuluswahl“ (engl. "choice of stimulus")). Die Ansprache, d.h. „Erregung“ der einzelnen Wettbewerbsneuronen auf ein gegebenes Eingabesignal ist verschieden stark und wird bestimmt durch die Ähnlichkeit zwischen dem Eingabevektor x und dem jeweiligen Referenzvektor m_i in Bezug auf ein geeignetes (Distanz-)Maß, in der Regel die sog. „EUKLIDISCHE Distanz“ (engl. "Euclidean distance")⁹⁸⁴, gekennzeichnet durch $\|\cdot\|$. Je ähnlicher also der Eingabevektor dem entsprechenden Referenzvektor ist, desto stärker wird das zugehörige Neuron „erregt“, m.a.W. das sog. „Erregungszentrum“ (engl. "location of the response") bzw. das sog. „Gewinnerneuron“ c (engl. "winner neuron" oder "Best-Matching Unit (BMU)") wird definiert durch die minimalste EUKLIDISCHE Differenz zwischen dem Eingabevektor und den jeweiligen Referenzvektoren im Rahmen der sog. „Gewinnerfunktion“ (engl.

983 Sofern eine kontinuierliche Zufallsvariable X gegeben ist, d.h. die von X angenommenen Werte ξ sind kontinuierlich verteilt, bezeichnet man w als sog. „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“ (engl. "probability density function") und $w(\xi)$ als die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariablen, die dabei den folgenden allgemeinen Eigenschaften zu genügen hat:

$$(1) \quad \forall \xi: w(\xi) \geq 0, \quad (76)$$

$$(2) \quad W\{a \leq X \leq b\} = \int_a^b w(\xi) d\xi, \quad (77)$$

$$(3) \quad \int_{-\infty}^{\infty} w(\xi) d\xi = 1. \quad (78)$$

D.b., $w(\xi)d\xi$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit W , daß die Zufallsvariable X einen Wert in dem Intervall $[a, b]$ annimmt.

S. hierzu z.B. D. APPLEBAUM: Probability and Information: An Integrated Approach. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1996. PP. 136-64, v.a. PP. 138-41 – Fr. SCHWABL: Statistische Mechanik. Springer-Verlag. 3. Aufl. Berlin u.a. 2006. S. 4 – H. RITTER / Th. MARTINETZ / Kl. SCHULTEN: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke. Addison-Wesley Publishing Company. Bonn u.a. 1990. S. 195-97 – A. SCHERER: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 31-32 – Th.M. COVER / J.A. THOMAS: Elements of Information Theory. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Hoboken/NJ. 2006. P. 243.

S. auch H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. (1982) 1990. S. 26-29 – Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/ MA. 2003 – W. STEGMÜLLER: Personelle und Statistische Wahrscheinlichkeit. Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Teil IV. Erster Halbband: Personelle Wahrscheinlichkeit und Rationale Entscheidung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1973. S. 209-15, 254-56, 271-84, 412-16.

984 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.210 Fn. 778.

“Winner-Take-All (WTA) function”)⁹⁸⁵ gemäß⁹⁸⁶:

$$c = \operatorname{argmin}_i \{ \|x(t) - m_i(t)\| \}. \quad (79)$$

Abschließend wird nun, nachdem das Neuron mit dem am besten übereinstimmenden Referenzvektor bestimmt worden ist (sog. “response”), an diesem Neuron und seinen topologischen „Nachbarn“ diese Übereinstimmung noch erhöht, indem eine Veränderung des Referenzvektors und dessen Nachbarvektoren in Richtung des aktuellen Eingabevektors um einen Bruchteil der gesamten Differenz erfolgt, bestimmt durch die zeitlich veränderliche sog. „Lernrate“ (engl. “learning-rate factor”)⁹⁸⁷ $\alpha(t)$ und die sog. „Distanz-“ oder „Nachbarschaftsfunktion“ (engl. “neighborhood function” oder “neighborhood kernel”)⁹⁸⁸ h_{ci} gemäß⁹⁸⁹:

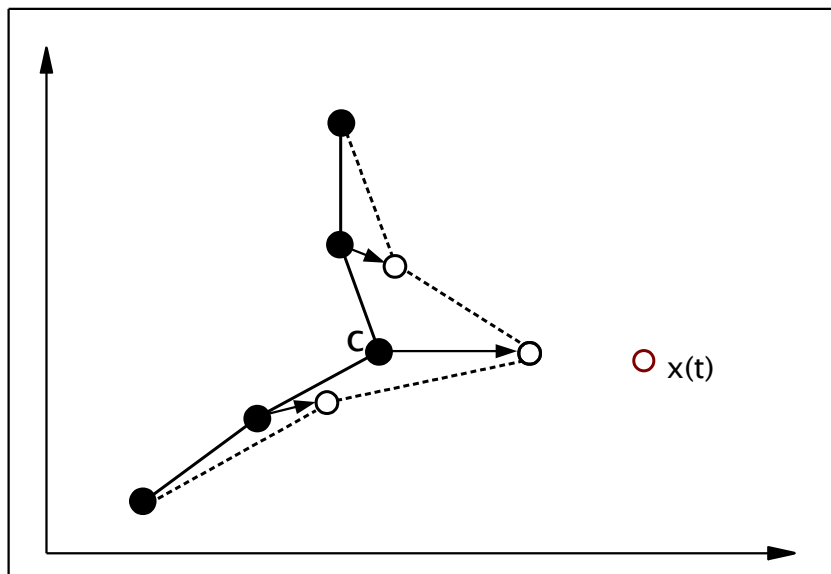
$$m_i(t+1) = m_i(t) + \alpha(t) h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)], \quad (80)$$

-
- 985 Eine grundlegende Behandlung der Gewinner- und Nachbarschaftsfunktion findet sich in T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. PP. 110-111.
Den komprimierten SOM-Algorithmus findet man am anschaulichsten in H. RITTER / Th. MARTINETZ / Kl. SCHULTEN: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke. Addison-Wesley Publishing Company. Bonn u.a. 1990. S. 58 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. S. 344 – A. SCHERER: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 101 – H. BRAUN / J. FEULNER / R. MALAKA: Praktikum Neuronale Netze. Springer-Verl. Berlin u.a. 1996. S. 63 und B. FRITZKE: Wachsende Zellstrukturen – ein selbstorganisierendes neuronales Netzwerkmodell. Dissertation. Technische Fakultät. Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen. 1992. S. 19, im Detail in M.M. VAN HULLE: Faithful Representations and Topographic Maps – From Distortion- to Information-Based Self-Organization. John Wiley. New York. 2000. P. 19.
Eine physiologische Interpretation des SOM-Algorithmus, insbesondere der “Winner-Take-All (WTA) function” und der “neighborhood function”, bietet T. KOHONEN: Physiological Interpretation of the Self-Organizing Map Algorithm. Neural Networks. Vol. 6. 1993. PP. 895-905, v.a. PP. 896-904 und T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. PP. 177-89.
- 986 S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. P. 110.
S. auch A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 181.
- 987 Die sog. „Lernrate“ (engl. “learning-rate factor”) $\alpha(t)$ ist dabei in der Regel eine monoton fallende Funktion.
S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. P. 111.
S. hierzu auch z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 181.
- 988 Die sog. „Distanz- oder Nachbarschaftsfunktion“ (engl. “neighborhood function” oder “neighborhood kernel”) h_{ci} ist dabei in der Regel eine monoton fallende Funktion.
S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. P. 111.
S. hierzu auch z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 181.
S. Fn. 985.
- 989 S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. P. 111.
S. auch A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 181.

wobei in der Regel die normalisierte GAUSSsche⁹⁹⁰ (Dichte-)Funktion $h_{ci,gauss}(t)$ als Nachbarschaftsfunktion verwendet wird, und dabei die Varianz $\sigma(t)$ die Breite des Nachbarschaftskerns definiert, gemäß⁹⁹¹:

$$h_{ci,gauss}(t) = \frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)}\right), \quad (81)$$

wobei r_c und r_i die Vektoren der Position des Neurons c und des Neurons i im Neuronengitter bezeichnen.



Graphik.31: Schematisches Diagramm eines Lernschemas einer KOHONEN-Karte: Dargestellt wird die (geometrisch interpretierte) Bewegung, illustriert anhand der Pfeile, der hier – der Anschaulichkeit halber – 2-dimensionalen Synapsenvektoren (schwarze Punkte) des Gewinnerneurons (c) und seiner zwei Nachbarn, die ebenfalls im Rahmen der Nachbarschaftsfunktion angepaßt werden, in Richtung auf den Eingabevektor $x(t)$. Nach der Anpassung der Synapsengewichte erhält man die neuen Synapsenvektoren (weiße Punkte), die mit den gestrichelten Linien untereinander verbunden sind (angelehnt an M. BOGDAN / W. ROSENSTIEL: Grundlagen neuronaler Netze. Eine Einführung. Manuskript. 2004. S. 28 und A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 182).

M.a.W. das Gewinnerneuron „erregt“ andere Neuronen innerhalb einer bestimmten Umgebung und „hemmt“ weiter entfernt liegende nach dem sog. „Prinzip der lateralen Inhibition“ (engl. “principle of lateral inhibition”)⁹⁹², so-

990 Benannt nach dem Mathematiker, Astronomen, Geodät und Physiker Carl Friedrich GAUSS. Allgemein zur sog. „GAUSS-Verteilung“ (engl. “Gaussian distribution”) s. z.B. E.Th. JAYNES: Probability Theory: The Logic of Science. 7th Ed. Cambridge University Press. Cambridge. 2010. PP. 198-242.

991 S. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. P. 111. S. auch A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 181.

992 S. hierzu z.B. M.F. BEAR / B.W. CONNORS / M.A. PARADISO: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag.

daß es, das ohnehin von allen Referenzvektoren der Neuronen der KOHONEN-Schicht dem Eingangsvektor am ähnlichsten ist, und einige Neuronen in seinem Umfeld dem Eingangsmuster noch um einen gewissen Betrag angenähert wird (sog. „Adaptation(-s(-lern-)schritt)“ (engl. “adaptation step”)) (s. Graphik.31).

Die Menge aller Punkte aus dem Eingabevektorraum V , die das gleiche Erregungszentrum c haben, bildet nun ein Polygon F_c , das sog. „VORONOI-Polygon“ (engl. “VORONOI polygon”), wobei die Gesamtheit der VORONOI-Polygone eine Parkettierung oder Partitionierung des Eingaberaums ergibt, die sog. „VORONOI-Teilung“ oder „VORONOI-Zerlegung“ (engl. “VORONOI tessellation”)⁹⁹³. Das Ziel des KOHONEN-Algorithmus besteht nun darin, eine Belegung der Referenzvektoren m_i zu finden derart, daß die sich ergebende Abbildung vom Eingabevektorraum V auf die topologische Struktur A folgende zwei Eigenschaften besitzt, u.z., erstens, die sog. „Topologieerhaltung“ (engl. “topology preserving”), d.h. ähnliche Eingabevektoren sollen auf benachbarte oder die gleichen formalen Neuronen in der Struktur A abgebildet werden, sodaß benachbarte Elemente in der Struktur A auch ähnliche Referenzvektoren besitzen, und, zweitens, die sog. „Verteilungserhaltung“ (engl. “distribution preservation”), d.h. die Gebiete des Eingaberaums V mit einer hohen Wahrscheinlichkeitsdichte $w(x)$ sollen auf entsprechend große Bereiche in der Struktur A abgebildet werden, sodaß sich die relative Dichte der Referenzvektoren in A an die Wahrscheinlichkeitsdichte $w(x)$ annähert bzw. anpaßt.⁹⁹⁴

4.4.01.2 Aus der Standard SOM sind nun diverse Varianten von Architekturtypen entwickelt worden⁹⁹⁵, z.B. sog. “Growing SOMs”, “Hierarchical SOMs”, “Tree-Structured SOMs”, “Growing Hierarchical SOMs”, die “ASSOM” und diverse andere.

4.4.01.3 Die Selbstorganisierende (Merkmals-)Karte hat eine Vielzahl von Anwendungen erfahren⁹⁹⁶, vor allem auch in der Sprachverarbeitung⁹⁹⁷, z.B. in

Heidelberg. 2009. S. 441.

993 S. hierzu z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 466-70 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin u.a. 1998. S. 136 – S. KNIELING: Einführung in die Modellierung künstlich neuronaler Netzwerke. WiKu-Verlag für Wissenschaft und Kultur. 2007. S. 67.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.14.05.1.

994 S. z.B. B. FRITZKE: Wachsende Zellstrukturen – ein selbstorganisierendes neuronales Netzwerkmodell. Dissertation. Technische Fakultät. Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen. 1992. S. 14-16.

995 S. z.B. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. Chap. 5. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2001. PP. 191-243.

Eine ausführliche Einführung und Übersicht über die diversen Architekturtypen von Kohonen-Karten bietet H. MAURER: Die Architekturtypen des „Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)“ nach Teuvo Kohonen. BoD-Verlag, Norderstedt, 2009 und H. MAURER / M. BOGDAN / W. ROSENSTIEL: Architecture Types of T. Kohonen's Self-Organizing Feature Map (SO(F)M). Manuscript. 2007.

996 S. hierzu s. z.B. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2001. PP. 263-310, 358-69 – T. KOHONEN: Overture. In: Seiffert, U. / Jain, L.C. (Eds.): Self-Organizing Neural Networks: Recent Advances and Applications. Physica-Verlag, Heidelberg, New York. 2002. PP. 9-10.

997 S. z.B. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2001. PP. 281-86 – Br.

Bezug auf die semantischen Karten (engl. "semantic maps") i.S. H. RITTER's und T. KOHONEN's.⁹⁹⁸

4.4.01.4 Schließlich wird zur Implementation des SOM-Algorithmus ein Softwarepaket, das sog. "SOM_PAK"⁹⁹⁹, angeboten.

ANDERSON: Kohonen Neural Networks and Language. Brain and Language. Vol. 70. 1999. PP. 86-94.

Einführend s. z.B. M. KÖHLE: Neurale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 159-67.

998 S. H. RITTER / T. KOHONEN: Self-Organizing Semantic Maps. Biological Cybernetics. Vol. 61. 1989. PP. 241-54.

Einführend s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 474-76.

999 S. hierzu z.B. T. KOHONEN: Self-Organizing Maps. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001. PP. 311-28 und <http://www.cis.hut.fi/research/som-research/nnrc-programs.shtml>.

4.4.02 ADAPTIVE RESONANCE THEORY NACH St. GROSSBERG UND G.A. CARPENTER

4.4.02.0 Einen ebenfalls selbstorganisierten (Lern-)Algorithmus im Rahmen eines unüberwachten (Wettbewerbs-)Lernverfahrens (engl. "unsupervised competitive learning")¹⁰⁰⁰ verwendet die sog. „Adaptive Resonanztheorie“ (engl. "Adaptive Resonance Theory (ART)")¹⁰⁰¹ des U.S.-amerikanischen Mathematikers und Neuroinformatikers Steven GROSSBERG¹⁰⁰² und der U.S.-amerikanischen Mathematikerin und Neuroinformatikerin Gail A. CARPEN-

1000 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.213, 2.24, 4.2.

1001 Grundlegend hierzu s. z.B. St. GROSSBERG: On the Development of Feature Detectors in the Visual Cortex with Applications to Learning and Reaction-Diffusion Systems. *Biological Cybernetics*. Vol. 21. 1976. PP. 145-59 – St. GROSSBERG: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: I. Parallel Development and Coding of Neural Feature Detectors. *Biological Cybernetics*. Vol. 23. 1976. PP. 121-34 – St. GROSSBERG: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: II. Feedback, Expectation, Olfaction, and Illusions. *Biological Cybernetics*. Vol. 23. 1976. PP. 187-202 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. Vol. 37. 1987. PP. 54-115, v.a. PP. 55-56, 60-70 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: ART 2: Stable Self-Organization of Pattern Recognition Codes for Analog Input Patterns. *Applied Optics*. Vol. 26. 1987. PP. 4919-30 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: The ART of Adaptive Pattern Recognition by a Self-Organizing Neural Network. *Computer*. Vol. 21. 1988. PP. 77-88.

Eingehend s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Self-Organizing Neural Network Architectures for Real-Time Adaptive Pattern Recognition. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): *An Introduction to Neural and Electronic Networks*. Academic Press. San Diego. 1990. PP. 455-78.

Einleitend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Adaptive Resonance Theory. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 87-90 – G.A. CARPENTER: Adaptive Resonance Theory. In: Cl. SAMMUT / G.I. WEBB (Eds.): *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer Science + Business Media. New York. 2011. PP. 23-36 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Adaptive Resonance Theory. *Neural Network Architectures for Self-Organizing Pattern Recognition*. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science Inc. New York. 1990. PP. 383-89.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: *Simulation Neuronaler Netze*. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 251-83 – D. GRAUPE: *Principles of Artificial Networks*. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 179-208 – G.D. REY / K.F. WENDER: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011. S. 74-75 – A. SCHERER: *Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen*. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997. S. 108-24.

S. auch H.-H. BOTHE: *Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 151-62 – T. TANAKA / A. WEITZENFELD: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: *The Neural Simulation Language: A System for Brain Modeling*. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 157-69 – E. SAPOJNIKOVA: *ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification*. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 15-16, 23-44 – N. KASABOV: *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998. PP. 290-93 – Th. ZABEL: *Klassifikation mit neuronalen Netzen*. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005. S. 61-98 – P. LIVET: *Self-Organization in Second-Order Cybernetics: Deconstruction or Reconstruction of Complexity*. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 249-63, v.a. PP. 257-62.

1002 Zur Person Steven GROSSBERG's siehe die Website <http://cns-web.bu.edu/~steve/>.

TER¹⁰⁰³, die damit eine ganze Klasse von neurobiologisch und (kognitions-)psychologisch sehr plausiblen Modellen entwickelt haben, um – ursprünglich – das sog. „Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma“ (engl. “stability-plasticity dilemma”)¹⁰⁰⁴ von künstlichen neuronalen Netzwerken zu lösen, d.h. das (Klassifikations-)Problem¹⁰⁰⁵, daß man vektorielle Informationen in Form einer zu lernenden Abfolge von Eingabemustern selbständig derart zu einem (synchronen) statistischen Prototypen integriert, daß die bereits gelernten und gespeicherten Assoziationen des künstlichen neuronalen Netzwerks an bisher neue Eingabemuster adaptiv-dynamisch angepaßt werden können (sog. „Plastizität“), ohne daß dadurch diese alten Assoziationen wieder zu stark modifiziert werden (sog. “catastrophic forgetting”¹⁰⁰⁶), sodaß die Bewahrung der einmal gelernten Muster damit gewährleistet wird (sog. „Stabilität“), m.a.W. in die grundlegende Fragestellung mündet: „Wie können neue Assoziationen in einem neuronalen Netz gelernt werden, ohne daß alte Assoziationen dabei vergessen werden?“¹⁰⁰⁷

Aus diesem Grund versuchen alle ART-Modelle – das menschliche Lernverhalten simulierend – das Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma zu lösen, indem sie sehr starke Modifikationen der bisher gelernten (Verbindungs-)Gewichte in einem Muster zu verhindern versuchen, sodaß ein bestimmtes neues Trainingsmuster eine bereits gespeicherte prototypische Kategorie nicht überdecken oder sogar zerstören kann, aber ebenso ein neues Trainingsmuster in nur einem Trainingszyklus präsentiert werden muß, um eine neue prototypi-

1003 Zur Person Gail A. CARPENTER's siehe die Website <http://techlab.bu.edu/members/gail/>.

1004 Grundlegend hierzu s. z.B. M.A. COHEN / St. GROSSBERG: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 13. 1983. PP. 815-26 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. Vol. 37. 1987. PP. 54-115, v.a. PP. 55-56 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: ART 2: Stable Self-Organization of Pattern Recognition Codes for Analog Input Patterns. *Applied Optics*. Vol. 26. 1987. PP. 4927-29 – St. GROSSBERG: Competitive Learning: From Interactive Activation to Adaptive Resonance. In: St. GROSSBERG (Ed.): *Neural Networks and Natural Intelligence*. MIT Press. Cambridge/MA. 1988. PP. 218-19, 221-23 – St. GROSSBERG: How does a Brain Build a Cognitive Code? *Psychological Review*. Vol. 87. 1980. PP. 1-51, v.a. PP. 28-30.

Einführend hierzu s. z.B. H.-H. BOTHE: *Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 91-92 – A. ZELL: *Simulation Neuronaler Netze*. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 251 – S. HAYKIN: *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 3-4.

S. auch W.C. ABRAHAM / A. ROBINS: Memory Retention – the Synaptic Stability versus Plasticity Dilemma. *Trends in Neurosciences*. Vol. 28. 2005. PP. 73-78 – B. YEGNANARAYANA: Artificial Neural Networks for Pattern Recognition. *Sādhanā*. Vol. 19. 1994. PP. 193, 227-29 – D.M. TUCKER: Motivated Anatomy: A Core-and-Shell Model of Corticolimbic Architecture. In: G. GAINOTTI (Ed.): *Handbook of Neuropsychology*. 2nd Ed. Vol. 5: Emotional Behavior and its Disorders. Elsevier Science. Amsterdam. 2001. PP. 146-47 – K.A. NORMAN / E.L. NEWMAN / A.J. PEROTTE: Methods for Reducing Interference in the Complementary Learning Systems Model: Oscillating Inhibition and Autonomous Memory Rehearsal. *Neural Networks*. Vol. 18. 2005. PP. 1212-28.

1005 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.213, 2.284.

1006 S. hierzu z.B. St. GROSSBERG / M. VERSACE: Spikes, Synchrony, and Attentive Learning by Laminar Thalamocortical Circuits. *Brain Research*. Vol. 1218. 2008. P. 283.

1007 A. ZELL: *Simulation Neuronaler Netze*. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 251.

sche Kategorie zu erzeugen.

Im folgenden wird die Architektur und der Algorithmus des ART-1-Netzwerks im wesentlichen beschrieben, der ersten Version der ART-Modellklasse, und danach noch kurz auf die anderen Versionen: ART-2, ART-2a, ART-3, ARTMAP und FUZZY ART eingegangen.¹⁰⁰⁸

4.4.02.1 Ein ART-1-Netzwerk¹⁰⁰⁹ (s. Graphik.32), das (nur) für das Lernen von binären Eingabevektoren geeignet ist, besteht aus zwei Schichten von Neuronen, die in einer sog. „Vergleichsschicht“ (engl. “comparison layer”) F_1 , die formal als Eingangsschicht dient, und einer sog. „Erkennungsschicht“ (engl. “recognition layer”) F_2 , die die Klassifikationsneuronen enthält, angeordnet sind, wobei die beiden Schichten bidirektional über Gewichtsmatrizen miteinander verbunden sind, und der Datentransfer zwischen den beiden Schichten anhand einer nichtlinearen Kontrollstrategie gesteuert wird,

¹⁰⁰⁸ Einen Überblick über die Typologie von ART-Architekturen bietet z.B. E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 23-25 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005. S. 74-75.

¹⁰⁰⁹ Grundlegend hierzu s. z.B. St. GROSSBERG: On the Development of Feature Detectors in the Visual Cortex with Applications to Learning and Reaction-Diffusion Systems. Biological Cybernetics. Vol. 21. 1976. PP. 145-59 – St. GROSSBERG: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: I. Parallel Development and Coding of Neural Feature Detectors. Biological Cybernetics. Vol. 23. 1976. PP. 121-34 – St. GROSSBERG: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: II. Feedback, Expectation, Olfaction, and Illusions. Biological Cybernetics. Vol. 23. 1976. PP. 187-202 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 54-115, v.a. PP. 55-56, 60-70, wo die Arbeitsweise des Netzwerks im wesentlichen beschrieben wird.

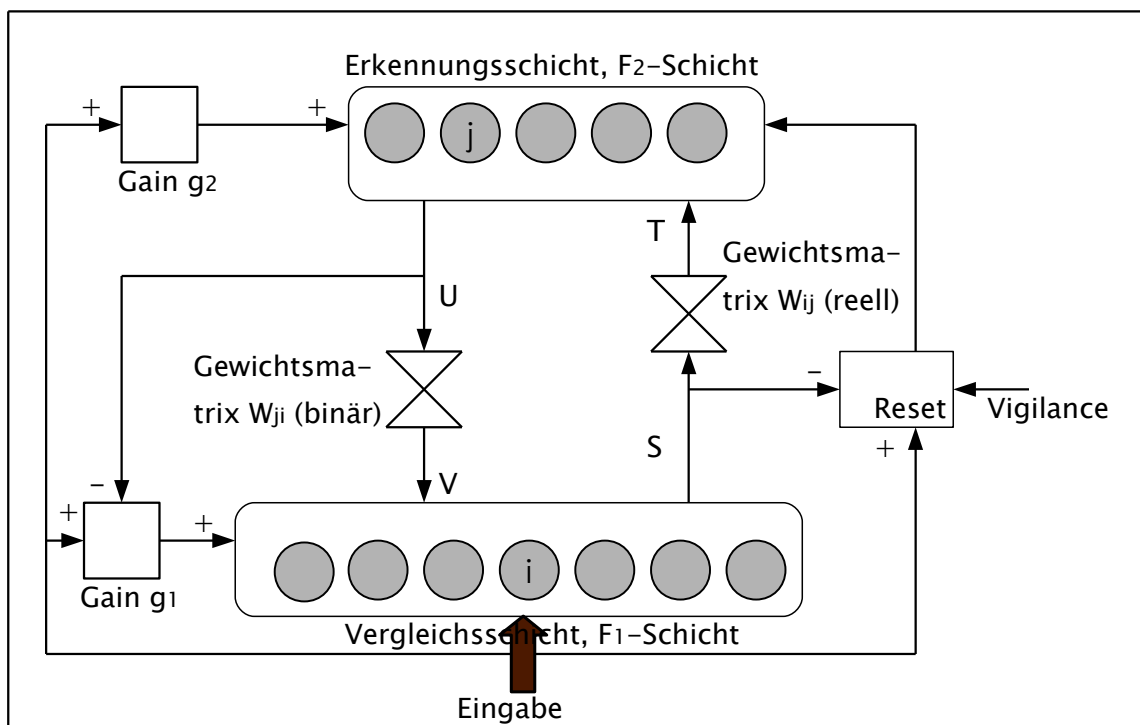
Eingehend s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Self-Organizing Neural Network Architectures for Real-Time Adaptive Pattern Recognition. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. Academic Press. San Diego. 1990. PP. 458-63.

Einleitend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Adaptive Resonance Theory. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 87-88 – G.A. CARPENTER: Adaptive Resonance Theory. In: Cl. SAMMUT / G.I. WEBB (Eds.): Encyclopedia of Machine Learning. Springer Science + Business Media. New York. 2011. PP. 24-29 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Adaptive Resonance Theory. Neural Network Architectures for Self-Organizing Pattern Recognition. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): Parallel Processing in Neural Systems and Computers. Elsevier Science Inc. New York. 1990. PP. 383-84.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 252-58 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. PP. 179-208, mit zwei Beispielfällen und dem Programmiercode in Java – R. ROJAS: Neural Networks. A Systematic Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1996. S. 363-66 – M. KÖHLE: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990. S. 152-59 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 152-57 mit einem Beispielfall – T. TANAKA / A. WEITZENFELD: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: The Neural Simulation Language: A System for Brain Modeling. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 157-69 mit einem Beispielfall und dem Programmiercode.

S. auch E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 23-34 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005. S. 63-73, 75-79.

u.z. ist die F_1 -(Vergleichs-)Schicht, die als ein Kurzzeitgedächtnis (engl. "short term memory (STM)")¹⁰¹⁰ angesehen werden kann, über eine reellwertige bottom-up-Gewichtsmatrix W_{ji} mit der F_2 -(Erkennungs-)Schicht, die als ein Langzeitgedächtnis (engl. "long term memory (LTM)")¹⁰¹¹ angesehen werden kann, verbunden, und die F_2 -(Erkennungs-)Schicht über eine binärwertige top-down-Gewichtsmatrix W_{ij} mit der F_1 -(Vergleichs-)Schicht. Desweiteren ist eine Komponente zur Synchronisationskontrolle eingefügt, die aus als Verstärkungsfaktoren (engl. "gain") bezeichneten Neuronen g_1 und g_2 bestehen, die aber der Synchronisation des Netzwerks dienen, und eine Komponente zur Orientierungskontrolle, die anhand eines vom Entwickler einzustellenden sog. „Aufmerksamkeits-“ oder „Toleranzparameters“ (engl. "vigilance parameter") ρ das Einstellen der Größe einer (Prototyp-)Klasse und das Ausschalten von (Klassifikations-)Neuronen der F_2 -Schicht erlaubt (engl. "reset").



Graphik.32: Schematisches Diagramm einer ART-1 Architektur (in Anlehnung an A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 253). S. auch G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 54-115, v.a. P. 56, Fig. 1).

Die Arbeitsweise eines ART-1-Netzwerks besteht nun – nach der Initialisie-

1010 S. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 56, 60.

1011 S. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 56, 60, 61.

nung der Gewichte der beiden Gewichtsmatrizen und dem Einstellen des Toleranzparameters – aus vier Phasen¹⁰¹²:

1. In der sog. „Erkennungsphase“ (engl. “recognition”) wird ein Eingabevektor I in die F_1 -Schicht eingelesen und zunächst als eine Kopie in Form des Vektors S weitergegeben, wobei als nächstes für jedes (Klassifikations-)Neuron j in der F_2 -Schicht das Skalarprodukt als ein Ähnlichkeitsmaß zwischen seinem Referenz- bzw. Gewichtsvektor W_j und S gebildet wird, mit

1012 S. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 54-115, v.a. PP. 55-56, 60-70, wo die Arbeitsweise des Netzwerks im wesentlichen beschrieben wird.

Die Beschreibung orientiert sich dabei im wesentlichen an der Darstellung bei A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 255-58 – T. TANAKA / A. WEITZENFELD: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: The Neural Simulation Language: A System for Brain Modeling. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 157-62 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag, Berlin. 2005. S. 75-79.

Ein übersichtliches Schaubild zum ART-Algorithmus bieten z.B. B. MOORE: ART 1 and Pattern Clustering. In: D. TOURETZKY / G. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 174-85, v.a. P. 180 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag, Berlin. 2005. S. 71 – D. GRAUPE: Principles of Artificial Networks. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008. P. 185.

Eine einführende Darstellung der neuronalen und der synaptischen Dynamik anhand der von G.A. CARPENTER und St. GROSSBERG verwendeten nichtlinearen Differentialgleichungen erster Ordnung findet man bei E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag, Göttingen. 2004. PP. 25-27:

“The Short-Term-Memory (STM) or activation equations describe changes in the activities of neurons, while the Long-Term-Memory (LTM) or learning equations describe synaptic dynamics.”

(...)

STM equations

“There are two main types of activation equations for a single neuron: the additive model and the multiplicative or shunting model. The additive model can be described as follows:

$$\frac{dx_i}{dt} = -A_i x_i + \sum_{j=1}^n s_j w_{ji} + I_i. \quad (82)$$

This equation for a neuron i includes a term for passive decay $-A_i x_i$, an external input I_i which can represent, for example, the magnitude of directly experienced sensory information, and the weighted sum of the inputs to the neuron i from all n nodes in the system $\sum_{j=1}^n S_j w_{ji}$. The term

$S_j = f(x_j)$ represents the output of a node j (...). A_i is a non-negative constant, and the larger it is, the faster the activity of the neuron will decay back to zero.”

(...)

“By contrast, in the multiplicative or shunting model the input is not added to, but multiplied by the neuronal activity before it affects a neuron:

$$\frac{dx_i}{dt} = -A_i x_i + (B_i - C_i x_i) \left[\sum_{j=1}^n f_j(x_j) w_{ji} + I_i \right] - (D_i x_i + E_i) \left[\sum_{j=1}^n g_j(x_j) w_{ji} + I_i \right]. \quad (83)$$

In this equation, A_i, B_i, C_i, D_i and E_i represent non-negative constants. State-dependent nonlinear signals are denoted as $f_j(x_j), g_j(x_j)$ and LTM traces as w_{ji}^+, w_{ji}^- . The notation w_{ji}^+ refers to excitatory weights, and w_{ji}^- to inhibitory ones. The excitatory and inhibitory external inputs are denoted as I_i and I_i^- , respectively. In this case, the activity x_i remains in the bounded interval

dem Ziel, das (Gewinner-)Neuron J mit der höchsten Netzeingabe t_j zu ermitteln, dessen Skalarprodukt am größten ist, d.h. das am stärksten aktiviert ist, sodaß nur dieses einzelne Neuron, dessen Gewichtsvektor dem Eingabevektor am ähnlichsten ist, feuert, sodaß gilt:

$$t_j = net_j = \langle S | W_j \rangle \quad \text{mit } W_j = \sum_i W_{ij} \quad (84)$$

und

$$u_j = \begin{cases} 1 & \text{falls } t_j = \max\{t_j: j=1, \dots, k\} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (85)$$

d.h., daß eine einzelne Komponente u_j des Vektors U auf '1' gesetzt wird,

$(-D_i/E_i, B_i/C_i)$. "

(...)

LTM equations (instar and outstar modules)

"While STM equations govern neuronal dynamics, LTM equations define the learning processes in an NN [Neural Network (A.d.V.)]."

(...)

"The first module known as *outstar* (...) carries out recall of learned patterns. It can learn to reproduce any arbitrary pattern of activity across some set of input neurons. A spatial pattern of activity will be registered on the nodes $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_n)$ while an input vector is present. Then after learning, subsequent activation of the output node x_0 transmits to the input nodes the signal pattern $(S_0 w_{01}, \dots, S_0 w_{0n})$, which is directly proportional to the prior spatial activity pattern, even when the input vector is absent. (...) A typical learning law for the outstar is given by

$$\frac{dw_{0i}}{dt} = (x_i - w_{0i}) S_0. \quad (86)"$$

(...)

"The second module – the *instar* (...), which is inverse to the outstar, appears in systems of adaptive coding, or content-addressable memory (CAM), and can learn to recognize any pattern of activity of input neurons (...). For example, suppose that the weight vector $\mathbf{w}=(w_{10}, \dots, w_{n0})$ approaches the incoming signal vector (S_1, \dots, S_n) while an input vector is present at the nodes $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_n)$. Then after learning, subsequent presentation of the same input pattern will maximally activate the node x_0 . It operates as an adaptive filter measuring similarity between an input pattern and patterns stored in the weights. An appropriate learning law for the instar is

$$\frac{dw_{i0}}{dt} = (S_i - w_{i0}) x_0. \quad (87)"$$

Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 72-75 – M.A. COHEN / St. GROSSBERG: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 13. 1983. PP. 815-26, v.a. P. 816 – St. GROSSBERG: A Prediction Theory for some Nonlinear Functional-Differential Equations, I: Learning of Lists. Journal of Mathematical Analysis and Applications. Vol. 21. 1968. PP. 643-94 – St. GROSSBERG: A Prediction Theory for some Nonlinear Functional-Differential Equations, II: Learning of Patterns. Journal of Mathematical Analysis and Applications. Vol. 22. 1968. PP. 490-522 – St. GROSSBERG: Neural Pattern Discrimination. Journal of Theoretical Biology. Vol. 27. 1970. PP. 291-337 – St. GROSSBERG: Neural Expectation: Cerebellar and Retinal Analogs of Cells Fired by Learnable or Unlearned Patterns Classes. Kybernetik. Vol. 10. 1972. PP. 49-57.

und alle anderen Komponenten werden auf '0' gesetzt.

Das Verfahren gleicht bis zu diesem Schritt dem Wettbewerbslernen, wie es bei der sog. „Selbstorganisierenden (Merkmals-)Karte“ (engl. “Self-Organizing (Feature) Map (SOM)”) nach dem finnischen Ingenieur Teuvo KOHONEN beschrieben worden ist¹⁰¹³: Es wird mit dem (Gewinner-)Neuron eine hypothetische (Prototyp-)Klasse erzeugt, d.h. das Netz „vermutet“ mit diesem Selektionsprozeß eines vektoriellen Prototyps, daß der angelegte Eingabevektor eine hinreichende Ähnlichkeit mit diesem vektoriellen Prototyp aufweist, was als das Aufstellen einer (Klassifikations-)Hypothese interpretiert wird.¹⁰¹⁴

2. In der sog. „Vergleichsphase“ (engl. “comparison”) wird daher diese Vermutung durch einen Vergleich zu bestätigen versucht, u.z. wird zunächst der hypothetische Prototyp W_j in Form des Vektors V , der gewichteten Summe der Ausgaben der F_2 -Schicht, wieder zur F_1 -Schicht zurückverrechnet, sodaß jedes Neuron i in der F_1 -Schicht ein binäres Signal v_i erhält, das gleich dem Wert von w_{ji} ist, gemäß

$$v_i = \sum_j u_j w_{ji} = w_{ji}. \quad (88)$$

Da nun in der F_2 -Schicht ein Neuron aktiviert worden ist, hat das Neuron g_1 den Aktivierungswert 0, sodaß in der F_1 -Schicht nur noch diejenigen Neuronen aktiv sind, die sowohl von dem Eingabevektor I als auch vom Vektor V das binäre Aktivierungssignal '1' erhalten¹⁰¹⁵, sodaß der neu erzeugte Ausgabevektor S der F_1 -Schicht möglichst eine hohe Anzahl von Vektorkomponenten mit dem Aktivierungssignal '1' besitzen sollte.

Die Entscheidung, ob das betreffende Eingabemuster tatsächlich in die Klasse gehört, wird dadurch gefällt, daß man die hinreichende Übereinstimmung bzgl. der Ähnlichkeit (engl. “similarity”) des Vektors des Eingabemusters I mit dem neu erzeugten Ausgabevektor S der F_1 -Schicht berechnet gemäß

$$\frac{|S|}{|I|} = \frac{|W_j \wedge I|}{|I|} \oplus \rho. \quad (89) \quad 1016$$

1013 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

1014 S. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 759-71, v.a. PP. 759-762 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / J.H. REYNOLDS: ARTMAP: Supervised Real-Time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-Organizing Neural Network. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 565-88, v.a. PP. 565-69, 580 – St. GROSSBERG / M. VERSACE: Spikes, Synchrony, and Attentive Learning by Laminar Thalamocortical Circuits. Brain Research. Vol. 1218. 2008. P. 283.

1015 S. im einzelnen zur sog. 2/3-Regel (engl. “2/3 rule”) der (Vergleichs-)Schicht F_1 z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 64-67.

1016 S. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 69-70 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: ART 2: Stable Self-Organization of Pattern Recognition Codes for Analog Input Patterns. Applied Optics. Vol. 26. 1987. PP. 4919-30, v.a. P.

3. Daher ergeben sich im Rahmen der sog. „Suchphase“ (engl. “search”) nun folgende Alternativen: Sofern der Vergleich der Ähnlichkeit zwischen dem Eingabe- und dem Prototypvektor die bereits erwähnte Toleranz unterschreitet, und daher die Übereinstimmung zwischen dem Eingabevektor I mit dem neu erzeugten Ausgabevektor S nicht hinreichend groß ist, d.h. die (Klassifikations-)Hypothese nicht verifiziert werden konnte, wird diese hypothetische (Prototyp-)Klasse mit dem dazugehörigen Gewinnerneuron in der F_2 -Schicht über den Rücksetzmechanismus (engl. “(STM) reset (system)”) ¹⁰¹⁷ blockiert, sodaß im Rahmen einer erneuten Vergleichsphase ein neues, u.z. das nächstähnliche, Gewinnerneuron ermittelt und an die F_1 -Schicht zurückgeliefert wird. Dieser iterative Prozeß wird dabei solange durchgeführt, bis einer der beiden Fälle eintritt:

3.1 Wenn bei keiner der gespeicherten (Prototyp-)Klassen mit den dazugehörigen Gewinnerneuronen in der F_2 -Schicht die Übereinstimmung mit dem Eingabemuster hinreichend groß ist, sodaß sämtliche Neuronen der F_1 -Schicht blockiert wurden, dann wird ein bisher – vordefiniert – inaktives Neuron der F_2 -Schicht nun aktiviert, und dessen Gewichtsvektor W_j wird derart gesetzt, daß er dem Eingabevektor entspricht. Indem also dadurch im ART-Algorithmus eine neue Klasse mit dem Eingabevektor als Prototypen dynamisch erzeugt wird, kann das Informationsspektrum des künstlichen neuronalen Netzes erweitert werden, ohne daß die bereits gespeicherten Gewichtsvektoren der existierenden (Prototyp-)Klassen zu sehr verdeckt oder sogar ausgelöscht werden würden, und nicht – wie beim reinen Wettbewerbslernen – jedes Eingabemuster in eine bereits bestehende (Prototyp-)Klasse gezwungen werden würde, weshalb damit das vorher angeführte Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma gelöst wird.

3.2 Wenn aber bei einem der gespeicherten (Prototyp-)Klassen mit dem dazugehörigen Gewinnerneuron in der F_2 -Schicht die Übereinstimmung mit

4921 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 759-71, v.a. P. 761 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / J.H. REYNOLDS: ARTMAP: Supervised Real-Time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-Organizing Neural Network. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 565-88, v.a. P. 568.

Der vom Entwickler selbst einzustellende sog. „Aufmerksamkeits-“ oder „Toleranzparameter“ $\rho \in [0,1]$ (engl. “vigilance parameter”) definiert dabei den Grad an Übereinstimmung bzgl. der Ähnlichkeit (engl. “similarity”) des Vektors des Eingabemusters X mit dem jeweiligen Referenz- bzw. Gewichtsvektor w_j der Neuronen der F_2 -Schicht, berechnet anhand des Winkels zwischen dem Eingabevektor X und dem Gewichtsvektor W gemäß

$$\frac{X^T W}{|X||W|} \approx \cos(\alpha), \text{ mit } |X| = \sum_i x_i, \quad (90)$$

wobei α der Winkel zwischen den beiden Vektoren X und W ist.

In praktischen Anwendungen werden oft Werte für ρ im Bereich $0.7 < \rho < 0.99$ verwendet.

S. hierzu einfürend R. ROJAS: Neural Networks. A Systematic Introduction. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1996. P. 364 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag, Berlin. 2005. S. 63-64.

1017 S. hierzu z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. P. 76.

dem Eingabemuster hinreichend groß ist, d.h. sofern der Vergleich der Ähnlichkeit zwischen dem Eingabe- und dem Prototypvektor die bereits erwähnte Schwelle des Toleranzparameters überschreitet, dann ist das ART-1-Netzwerk für den betreffenden Eingabevektor in sog. „(adaptiver) Resonanz“ (engl. „(adaptive) resonance“)¹⁰¹⁸ und geht in einen entsprechenden Trainingszyklus über, wobei der binäre und der reellwertige Gewichtsvektor W_j , d.h. die Gewichtsvektoren, die zu dem Gewinnerneuron J der F_2 -Schicht gehören, derart modifiziert wird, daß er – wie beim reinen Wettbewerbslernen¹⁰¹⁹ – dem Eingabevektor angepaßt wird, sodaß die Ähnlichkeit verstärkt wird, und das Eingabemuster der entsprechenden (Prototyp-)Klasse zugeordnet wird, wobei jedoch ein einmal zugeordnetes Muster nicht mehr in eine neue (Prototyp-)Klasse eingeordnet wird, was ebenfalls zur Lösung des Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemmas beiträgt.¹⁰²⁰

4. Im Rahmen der sog. „Gewichtsadaptionsphase“ (engl. „training“) unterscheidet man bei ART-Netzwerken zwischen dem sog. „langsamen Training“ (engl. „slow training“, „slow learning“), das angewendet wird, sofern das zu erlernende Muster einem bereits gespeicherten ähnelt, und dem sog. „schnellen Training“ (engl. „fast training“, „fast learning“), das angewendet wird, sofern das zu erlernende Muster völlig unbekannt ist, wobei nur bei letzterem die Eingabevektoren über einen hinreichend langen Zeitraum angelegt werden, damit die reellwertigen bottom-up-Gewichtsvektoren und die binären top-down-Gewichtsvektoren des Netzwerks ihre asymptotischen, stabilen Werte erreichen können, u.z. wird der reellwertige bottom-up-Gewichtsvektor W_j auf die normalisierten Einträge des Vektors S gesetzt gemäß

$$w_{ij} = \frac{Ls_i}{L-1 + \sum_k s_k}, \quad (91)$$

und der binäre top-down-Gewichtsvektor W_j wird dem Vektor S angepaßt gemäß:

$$w_{ji} = s_i. \quad ^{1021} \quad (92)$$

1018 S. zum Begriff der sog. „(adaptiven) Resonanz“ (engl. „(adaptive) resonance“) z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: ART 2-A: An Adaptive Resonance Algorithm for Rapid Category Learning and Recognition. Neural Networks. Vol. 4. 1991. P. 498.

1019 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

1020 Zur Stabilitätsanalyse des ART-1-Netzwerks siehe im einzelnen B. MOORE: ART 1 and Pattern Clustering. In: D. TOURETZKY / G. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 174-85, v.a. PP. 176-77.

1021 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 81-87.

S. hierzu im einzelnen einführend A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 251, 257-58 – T. TANAKA / A. WEITZENFELD: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: The Neural Simulation Language: A Sys-

Abschließend sei noch erwähnt, daß G.A. CARPENTER und St. GROSSBERG¹⁰²² zu diversen Themen der Stabilität im Rahmen der Such- und Gewichtsadaptionsphase eine Reihe von Theoremen über das ART-1-Netzwerk bewiesen haben.

4.4.02.2 Eine Erweiterung von ART-1 stellt das ART-2-Netzwerk¹⁰²³ dar und das, im Vergleich dazu, vereinfachte ART-2A-Netzwerk¹⁰²⁴, um damit die Konvergenz von ART-2 zu beschleunigen, die die Sequenzen von Eingabevektoren mit kontinuierlichen, reellwertigen Komponenten klassifizieren.

4.4.02.3 Eine Weiterentwicklung von ART-2 stellt das ART-3-Netzwerk¹⁰²⁵ dar, das zusätzlich bestimmte chemische Prozesse von Synapsen, z.B. die Menge, die Ansammlung, die Freisetzung und den Abbau von Neurotransmittern, anhand von Differentialgleichungen modelliert.

4.4.02.4 Ein Fuzzy-ART-Netzwerk¹⁰²⁶ stellt eine Kombination von Fuzzy-Logik (engl. "fuzzy logic")¹⁰²⁷ mit einem ART-1-Netzwerk dar, sodaß ein dynami-

tem for Brain Modeling. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 157-69, v.a. PP. 161-62.

1022 S. im einzelnen hierzu z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 84-104.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 258 – T. TANAKA / A. WEITZENFELD: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: The Neural Simulation Language: A System for Brain Modeling. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 162-63 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 155-56.

1023 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: ART 2: Stable Self-Organization of Pattern Recognition Codes for Analog Input Patterns. Applied Optics. Vol. 26. 1987. PP. 4919-30. Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 257-68 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 157 – E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 38-39.

1024 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: ART 2-A: An Adaptive Resonance Algorithm for Rapid Category Learning and Recognition. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 493-504.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 268-70.

1025 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: ART 3: Hierarchical Search Using Chemical Transmitters in Self-Organizing Pattern Recognition Architectures. Neural Networks. Vol. 3. No. 2. 1990. PP. 129-52.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 270-73.

1026 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 759-71 – G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / D.B. ROSEN: A Neural Network Realization of Fuzzy ART. Boston University. Technical Report. CAS/CNS-91-021. 1991. PP. 1-16.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 279-83 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 218-20 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005. S. 80-87 – E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 39-44, 45-73.

1027 Grundlegend hierzu s. z.B. L. ZADEH: Fuzzy Sets. Information and Control. Vol. 8. 1965. PP. 338-53.

scher Assoziativspeicher entsteht, der den mit binärwertigen Eingangsvektoren arbeitenden ART-1-Algorithmus derart erweitert, daß auch reellwertige Eingabevektoren verarbeitet werden können, indem der Durchschnittsoperator (engl. "intersection operator") \cap im Rahmen der 2/3-Regel¹⁰²⁸ in der F_1 - (Vergleichs-)Schicht des Art-1-Netzwerks durch den MIN-Operator \wedge der Fuzzy (Mengen-)Theorie (engl. "fuzzy (set) theory") ersetzt wird.

4.4.02.5 Während die bisher erwähnten Typen von ART-Netzwerken eine adaptive Klassifikation von Eingabevektoren im Rahmen von unüberwachten Lernverfahren vorgenommen haben, klassifiziert das ARTMAP-Netz¹⁰²⁹ mit einem überwachten Lernverfahren¹⁰³⁰, indem es eine Kombination von jeweils zwei ART-1-, ART-2-, ART-3-, oder Fuzzy-ART-Netzwerken darstellt, sodaß anhand eines Eingabevektors und einem damit assoziierten Ausgabevektor eine genaue Einteilung der Klassenzugehörigkeit der Eingabemuster erreicht werden kann.

4.4.02.6 Um das Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma zu lösen, ist mit dem sog. "ART- Kohonen Neural Network (ART-KNN)" nach B.-S. YANG, T. HAN und Y.-S. KIM¹⁰³¹ auch versucht worden, den Lernalgorithmus der sog. "Self-Organizing (Feature) Map (SOM)" nach T. KOHONEN¹⁰³² mit der "Adaptive Resonance Theory (ART)" zu kombinieren.

4.4.02.7 Auf der Basis seiner Theorie der Adaptiven Resonanz mit dem oben beschriebenen grundlegenden ART-Modelltyp¹⁰³³ haben nun St. GROSSBERG et al.¹⁰³⁴ bereits seit den siebziger Jahren des 20. Jhdts. postuliert, daß der

Einführend hierzu s. z.B. H.J. ZIMMERMANN: Fuzzy Set Theory and its Applications. 2. Ed. Kluwer Academic. Boston u.a. 1994.

1028 S. Fn. 1015.

1029 Grundlegend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG / J.H. REYNOLDS: ARTMAP: Supervised Real-Time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-Organizing Neural Network. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 565-88.

Einleitend hierzu s. z.B. G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG: Adaptive Resonance Theory. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 88-89.

Einführend hierzu s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 273-79 – H.-H. BOTHE: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 158-62, 220 – Th. ZABEL: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005. S. 87-92, 93-98 – E. SAPOJNIKOVA: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004. PP. 34-38, 48-52.

1030 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.213, 2.24.

1031 S. B.-S. YANG / T. HAN / Y.-S. KIM: Integration of ART-Kohonen Neural Network and Case-Based Reasoning for Intelligent Fault Diagnosis. Expert System with Applications. Vol. 26. 2004. PP. 387-95.

1032 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

1033 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.02.1.

1034 Einen Überblick hierzu bietet z.B. St. GROSSBERG / D. SOMERS: Synchronized Oscillations During Cooperative Feature Linking in a Cortical Model of Visual Perception. Neural Networks. Vol. 4. No. 4. 1991. PP. 453-66 m.w.Lit., wobei dabei folgende kooperativen Kopplungsmechanismen zwischen den Neuronen(-aktivitäten) untersucht werden, u.z. das sog. "Cooperative Bipole Coupling", "Adaptive Filter Coupling", "Nearest Neighbor Coupling" und "Random Connection Coupling".

S. z.B. auch St. GROSSBERG: Principles of Cortical Synchronization. Commentary on: W.A. PHILLIPS

kortikale Kode (engl. "cortical code") und damit auch ein neuronaler Klassifikationsprozeß (engl. "matching process")¹⁰³⁵ anhand von – bereits oben erläuterten – resonanten Zuständen (engl. "resonant states") in Form von resonanten stehenden Wellen (engl. "resonant standing waves")¹⁰³⁶ modelliert werden könne, verursacht von synchronen (Phasen-)Oszillationen im Gamma-Bereich von 20-70 Hz der beteiligten kooperierenden Neuronenverbände im Rahmen von bottom-up und top-down Rückkopplungsschleifen (engl. "bottom-up and top-down feedback loops").

Dieser Ansatz ist nun im Jahre 2008 weiterentwickelt worden zum Modell der sog. "Synchronous Matching Adaptive Resonance Theory (SMART)"¹⁰³⁷, mit dem analysiert wird, wie das menschliche Gehirn verschiedene Ebenen der thalamokortikalen und kortikokortikalen Informationsverarbeitung derart koordiniert, daß reziproke topdown und bottom-up kortikokortikale und thalamokortikale adaptive Filter so zusammenarbeiten, daß der Zusammenhang zwischen Lernen, Aufmerksamkeit, Erwartung, Resonanz und Synchronizität aufgezeigt werden kann.

/ W. SINGER: In Search of Common Foundations for Cortical Computation. The Behavioral and Brain Sciences. Vol. 20. 1997. PP. 689-90.

S. auch G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG (Eds.): Pattern Recognition by Self-Organizing Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1991.

1035 S. St. GROSSBERG / M. VERSACE: Spikes, Synchrony, and Attentive Learning by Laminar Thalamocortical Circuits. Brain Research. Vol. 1218. 2008. PP. 279-80.

1036 S. St. GROSSBERG / D. SOMERS: Synchronized Oscillations During Cooperative Feature Linking in a Cortical Model of Visual Perception. Neural Networks. Vol. 4. No. 4. 1991. PP. 455-56, wobei die Autoren betonen, daß dieses mathematische Konzept – unter bestimmten Bedingungen – durch das des sog. Attraktors (engl. "attractor") ersetzt werden könne.

S. auch in Bezug auf das damit zusammenhängende sog. "COHEN-GROSSBERG Theorem": M.A. COHEN / St. GROSSBERG: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 13. 1983. PP. 815-26.

Einführend s. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 701-702 – A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 199-201 – B. YEGNANARAYANA: Artificial Neural Networks for Pattern Recognition. Sādhanā. Vol. 19. 1994. P. 207.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.2, 5.2, 6.2.

1037 Grundlegend hierzu s. St. GROSSBERG / M. VERSACE: Spikes, Synchrony, and Attentive Learning by Laminar Thalamocortical Circuits. Brain Research. Vol. 1218. 2008. PP. 278-312, v.a. PP. 283-86.

5. STRUKTURTHEORIE EINER INTEGRATIVEN THEORIE DER (NEURO-)KOGNITION: ARCHITEKTURTYPEN UND ARCHITEKTURKOMPONENTEN

Im vorliegenden Kapitel werden im Folgenden vier systematische Klassen von Architekturtypen im Systemtheoretischen Konnektionismus vorgestellt, u.z.

1. die Klassischen Vektor-basierten Architekturtypen (Kap. 5.1),
 2. die Attraktor-basierten Architekturtypen (Kap. 5.2),
 3. die Oszillator-basierten Architekturtypen (Kap. 5.3) und
 4. die Synapsen-basierten Architekturtypen (Kap. 5.4),
- wobei die Zuordnung der einzelnen (Neuro-)Architekturen nicht immer eindeutig sein wird.

5.1 SYSTEMATISCHE KLASSE DER KLASSISCHEN VEKTOR-BASIERTEN ARCHITEKTURTYPEN

5.10 Die systematische Klasse der (klassischen) Vektor-basierten Architekturtypen umfaßt diejenigen konnektionistischen Modelle, die versuchen, vor allem das (mathematische) Problem der sog. „Variablenbindung“ (engl. “variable binding”)¹⁰³⁸ anhand von Vektor- und Tensor Konstruktionen und damit einhergehenden integrativen Synchronisationsmechanismen im Rahmen der kontinuierlichen Mathematik zu lösen, d.h. das Problem eines (neuro-)kognitiven Systems, wie die Zuweisung bzw. „Bindung“ eines Werts (engl. “value”) bzw. Füllers (engl. “filler”) in Form eines semantischen Konzepts an eine Variable (engl. “variable”) in Form einer syntaktischen Funktion bzw. Rolle (engl. “role”) korrekt zu erfolgen hat, damit vor allem die Kriterien der Systematizität und der Kompositionalität von (komplexen) mentalen Repräsentationen, die in den Symbolstrukturen der klassischen Symboltheorie im Rahmen der diskreten Mathematik gewährleistet werden¹⁰³⁹, bei der Transformation in die betreffenden Vektor-basierten Konstruktionen und Mechanismen der konnektionistischen (Neuro-)Architekturen ebenfalls erhalten bleiben.

5.11 Um der grundsätzlichen Kritik am (Neo-)Konnektionismus in Bezug auf dessen Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik zu begegnen, d.h., dem Vorwurf der Symboltheoretiker, z.B. vor allem des U.S.-amerikanischen Philosophen Jerry A. FODOR und des kanadischen Philosophen Zenon W. PYLYSHYN (sog. “FODOR/PYLYSHYN Challenge”)¹⁰⁴⁰, oder des U.S.-amerikanischen Linguisten Ray JACKENDOFF (sog. “JACKENDOFF’s Four Challenges for Cognitive Neuroscience”)¹⁰⁴¹, daß die Konnektionisten mit ihren künstlichen neuronalen Netz-

1038 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3, Fn. 544.

1039 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14.

1040 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.242, 5.1.01.0 und vor allem Kap. 5.1.01.1.

1041 Nach R. JACKENDOFF: Foundations of Language. Brain, Meaning, Grammar, Evolution. Oxford University Press. Oxford. 2002. PP. 58-67, v.a. PP. 59, 61, 64, 65:

“3.5 Four challenges for cognitive neuroscience (...)

3.5.1. The massiveness of the binding problem

(...) The need for combining independent bits into a single coherent percept has been recognized in the theory of vision under the name of the *binding problem* (...).

(...)

However, the binding problem presented by linguistic structure is far more massive than this simple description. (...)

3.5.2. The problem of 2

(...)

The (...) problem occurs in conceptual structure when conceptualizing a relation involving two tokens of the same type (...) and in spatial structure when viewing or imagining two identical objects.

(...)

3.5.3. The problem of variables

(...)

(...) all combinatorial rules of language – formation rules, derivational rules, and constraints – require typed variables. (...) But some further technical innovation is called for in neural network models, which will permit them to encode typed variables and the operation of instantiating them.

(...)

werken keine systematischen und kompositionalen (mental) Repräsentationen, wie sie in der Klassischen Symboltheorie entworfen worden waren, erzeugen können, sind daraufhin konnektionistische (Neuro-)Architekturen entwickelt worden, die man als die Klasse der "Vector Symbolic Architectures (VSA)"¹⁰⁴² bezeichnet hat (s. Kap. 5.1.01, 5.1.02 und 5.1.03), die wiederum die Subklasse der sog. "Convolution-Based Memory Models (CBMMs)"¹⁰⁴³, auch als sog. "Holographic Memory Models"¹⁰⁴⁴ bezeichnet, (s. Kap. 5.1.02 und 5.1.03) enthält:

3.5.4 Binding in working memory vs. long-term memory

(...) contemporary neuroscience tends to see transient (short-term) connections among items in memory as instantiated either by spreading activation through synapses or by the 'binding' relation, often thought of in terms of firing synchrony. By contrast, lasting (long-term) connections are usually thought of as encoded in terms of strength of synaptic connections. However, the combinatoriality of language presents the problem that the very same relation may be encoded either in a transient structure or in one stored in memory."

- Eine eingehende Widerlegung der vier Herausforderungen R. JACKENDOFF's ist zu finden bei R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures Answer Jackendoff's Challenges for Cognitive Neuroscience. In: P. SLEZAK (Ed.): Proceedings of the Joint International Conference on Cognitive Science (ICCS/ASCS). Sydney/Australia. 13-17 July 2003. University of New South Wales. 2003. PP. 133-38 – R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 78-79.
- 1042 S. z.B. S.D. LEVY / R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence. In: P. WANG / B. GOERTZEL / St. FRANKLIN (Eds.): Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08). March 1-3, 2008. University of Memphis/TN. IOS Press. 2008. PP. 414-18 , v.a. P. 415 – R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures Answer Jackendoff's Challenges for Cognitive Neuroscience. In: P. SLEZAK (Ed.): Proceedings of the Joint International Conference on Cognitive Science (ICCS/ASCS). Sydney/Australia. 13-17 July 2003. University of New South Wales. 2003. PP. 133-38, v.a. P. 134 – R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 78-79, v.a. P. 78.
- Einen Vergleich der verschiedenen Modelle bieten z.B. T.A. PLATE: A Common Framework for Distributed Representation Schemes for Compositional Structure. In: F. MAIRE / R. HAYWARD / J. DIEDERICH: Connectionist Systems for Knowledge Representation and Deduction. Neurocomputing Research Centre Queensland University of Technology. Queensland University of Technology Press. Brisbane. 1997. PP. 15-34 – R.W. GAYLER: Multiplicative Binding, Representation Operators, and Analogy. [Abstract of Poster] In: K. HOLYOAK / D. GENTNER / B. KOKINOV: Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences. New Bulgarian University. NBU Press. Sofia. 1998.
- S. auch M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 635-38, v.a. PP. 636-37.
- 1043 S. z.B. T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York. 2003. PP. 824-28 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1002-10, v.a. P. 1007.
- 1044 S. z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1007-1008: Der Grund besteht darin, daß – wie bei einem optischen Hologramm – die (neuronal) Information über jedes Informationselement eines (Repräsentations-)Konzepts über das gesamte Speichermedium verteilt (engl. "distributed") ist.
- Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4.

Dazu gehört P. SMOLENSKY's sog. "Integrated Connectionist / Symbolic (ICS) Cognitive - Architecture" (s. Kap. 5.1.01), T.A. PLATE's sog. "Holographic Reduced Representations (HRRs)" (s. Kap. 5.1.02) sowie Chr. ELIASMITH's und T.C. STEWART's sog. "Neural Engineering Framework (NEF)" (s. Kap. 5.1.03). Zu erwähnen sind noch folgende Autoren, die sich mit diesen VSA- bzw. CBMMs-Modellen beschäftigt haben, und z.T. alternative Kompressionsformeln des zu Grunde liegenden Tensorprodukts P. SMOLENSKY's entwickelt haben, u.z. Simon D. LEVY¹⁰⁴⁵, Ross GAYLER¹⁰⁴⁶, Pentti KANERVA¹⁰⁴⁷ mit seinem sog. "Binary Spatter Co-

-
- 1045 S. z.B. S.D. LEVY: *Becoming Recursive: Toward a Computational Neuroscience Account of Recursion in Language and Thought*. In: H. van der HULST (Ed.): *Recursion and Human Language*. Mouton de Gruyter. Berlin u.a. 2009. PP. 371-92 – S.D. LEVY: *Changing Semantic Role Representations with Holographic Memory*. In: Cl.T. MORRISON / T. OATES (Eds.): *Computational Approaches to Representation Change during Learning and Development: Papers from the 2007 AAIL Symposium*. Technical Report FS-07-04. AAIL Press. MenloPark/CA. 2007. PP. 40-45 – S.D. LEVY: *Analogical Integration of Semantic Roles with Vector Symbolic Architectures*. In: A. SCHWERING / U. KRUMNACK / K.-U. KÜHNBERGER / H. GUST (Eds.): *Proceedings of the Workshop on Analogies: Integrating Multiple Cognitive Abilities (AnICA07)*. Nashville/TN. Publication Series of the Institute of Cognitive Science. Vol. 5. University of Osnabrueck. Osnabrück. 2007. PP. 9-14 – S.D. LEVY / S. KIRBY: *Evolving Distributed Representations for Language with Self-Organizing Maps*. In: P. VOGT et al. (Eds.): *Symbol Grounding and Beyond. Proceedings of the Third International Workshop on the Emergence and Evolution of Linguistic Communication (EELC)*. Rome/Italy. 30. Sep. - 1. Oct. 2006. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006. PP. 57-61 – S.D. LEVY / R. GAYLER: *Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence*. In: P. WANG / B. GOERTZEL / St. FRANKLIN (Eds.): *Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08)*. March 1-3, 2008. University of Memphis/TN. IOS Press. 2008. PP. 414-18.
- 1046 S. z.B. R. GAYLER: *Vector Symbolic Architectures Answer Jackendoff's Challenges for Cognitive Neuroscience*. In: P. SLEZAK (Ed.): *Proceedings of the Joint International Conference on Cognitive Science (ICCS/ASCS)*. Sydney/Australia. 13-17 July 2003. University of New South Wales. 2003. PP. 133-38 – R. GAYLER: *Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges*. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: *Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 78-79 – S.D. LEVY / R. GAYLER: *Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence*. In: P. WANG / B. GOERTZEL / St. FRANKLIN (Eds.): *Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08)*. March 1-3, 2008. University of Memphis/TN. IOS Press. 2008. PP. 414-18 – R.W. GAYLER / R. WALES: *Connections, Binding, Unification, and Analogical Promiscuity*. In: K. HOLYOAK / D. GENTNER / B. KOKINOV (Eds.): *Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences*. New Bulgarian University. Sofia. 1998. PP. 181-90 – R.W. GAYLER: *Multiplicative Binding, Representation Operators, and Analogy*. [Abstract of Poster] In: K. HOLYOAK / D. GENTNER / B. KOKINOV: *Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences*. New Bulgarian University. NBU Press. Sofia. 1998.
- 1047 S. z.B. P. KANERVA: *Hyperdimensional Computing: An Introduction to Computing in Distributed Representation with High-Dimensional Random Vectors*. *Cognitive Computation*. Vol. 1. 2009. PP. 139-59 – P. KANERVA: *Fully Distributed Representation*. *Proceedings of the 1997 Real World Computing Symposium (RWC'97, Tokyo)*. Report TR-96001. Real World Computing Partnership. Tsukuba-City/Japan. 1997. PP. 358-65 – P. KANERVA: *Sparse Distributed Memory and Related Models*. In: M.H. HASSOUN (Ed.): *Associative Neural Memories: Theory and Implementation*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 50-76.
- S. auch P. KANERVA: *Sparse Distributed Memory*. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 1990.

de¹⁰⁴⁸, sowie D.A. RACHKOVSKIJ und E.M. KUSSUL¹⁰⁴⁹. Zu dem CBMMs-Modelltyp gehört ferner das sog. "Theory of Distributed Associative Memory" (TODAM) B.B. MURDOCK's¹⁰⁵⁰ und das sog. "Composite Holographic Associative Recall Model (CHARM)" J. METCALFE EICH's¹⁰⁵¹, auf die in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen werden kann.

Im Gegensatz zu konventionellen konnektionistischen Architekturen¹⁰⁵² kann eine VSA-Architektur eine Teil/Ganzes-Relation wiedergeben, indem über eine (Variablen-)Bindungsoperation, mathematisch eine Vektormultiplikation i.w.S., ein semantischer (Füller-)Vektor mit einem syntaktischen (Rollen-)Vektor derart kombiniert wird, daß einem semantischen Gehalt eine syntaktische Position zugewiesen wird (sog. "operation of binding")¹⁰⁵³, und über eine Verschmelzungs- oder Bündelungsoperation, mathematisch eine Vektoraddition i.S. einer Superpositionsoperation (engl. "superposition operation")¹⁰⁵⁴, eine komplexere Struktur erzeugt werden kann (sog. "operation of merging"¹⁰⁵⁵ oder "operation of bundling")¹⁰⁵⁶, sodaß anhand dieser beiden, rekursiv anwendbaren VSA-Operationen die Bedeutungen eines komplexen Terms aus den Bedeutungen seiner syntaktischen Komponententerme erzeugt wird, und damit eine VSA-Architektur, indem die semantische Struktur ein homomorphes Bild der syntaktischen Struktur der Terme der abzubildenden Sprache darstellt, eine kompositionale Se-

1048 S. z.B. P. KANERVA: The Spatter Code for Encoding Concepts at Many Levels. In: M. MARINARO / P.G. MORASSO (Eds.): Proceedings of International Conference on Artificial Neural Networks 1994 (ICANN.94). Sorrento, Italy, 26-29 May, 1994. Springer-Verlag. London u.a. PP. 226-29 – P. KANERVA: Binary Spatter-Coding of Ordered K-Tuples. In: Chr. von der MALSBURG / W. von SEELEN / J. VORBRUGGEN / B. SENDHOFF (Eds.): Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN96). Bochum, Germany. July 16-19, 1996. Springer Verlag. Berlin u.a. 1996. PP. 869-73, v.a. PP. 870-72.

Einführend s. z.B. R.S. SUTTON / A.G. BARTO: Reinforcement Learning. An Introduction. A Bradford Book, The MIT Press. London. 1998. PP. 209-10.

1049 S. z.B. D.A. RACHKOVSKIJ / E.M. KUSSUL: Binding and Normalization of Binary Sparse Distributed Representations by Context-Dependent Thinning. *Neural Computation*. Vol. 13. 2001. PP. 411-52.

1050 S. z.B. B.B. MURDOCK: A Theory for the Storage and Retrieval of Item and Associative Information. *Psychological Review*. Vol. 89. 1982. PP. 316-38.

1051 S. z.B. J. METCALFE EICH: A Composite Holographic Associative Recall Model. *Psychological Review*. Vol. 89. 1982. PP. 627-61.

1052 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.

1053 S. z.B. S.D. LEVY / R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence. In: P. WANG / B. GOERTZEL / St. FRANKLIN (Eds.): Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08). March 1-3, 2008. University of Memphis/TN. IOS Press. 2008. P. 415 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 636-37.

1054 S. hierzu z.B. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 1003.

1055 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 636-37.

1056 S. S.D. LEVY / R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence. In: P. WANG / B. GOERTZEL / St. FRANKLIN (Eds.): Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08). March 1-3, 2008. University of Memphis/TN. IOS Press. 2008. P. 415.

mantik besitzt.

5.12 Die systematische Klasse der (klassischen) Vektor-basierten Architekturtypen umfaßt dann noch diejenigen konnektionistischen Modelle, die entweder dem sog. „symbolischen bzw. strukturierten Konnektionismus“ (engl. “symbolic/structured connectionism”) angehören (Kap. 5.1.04, 5.1.05), d.h., die z.B. lokale und distribuierte Repräsentationsformate zugleich verwenden, oder über eine sog. „hybride Architektur“ (engl. “hybrid architecture”) verfügen (Kap. 5.1.08), d.h. ein aus konnektionistischen und symbolischen Modulen bestehendes Modell, oder sogar über ein beinahe klassisches Symbolsystem mit einem lokalen Repräsentationsformat (Kap. 5.1.09). Desweiteren gehören hierzu diejenigen konnektionistischen Architekturen, dessen Bindungsverfahren in Form von z.B. sog. „konjunktiven Bindungsknoten“ (engl. “Conjunctive Binding Nodes (CBN)”) dem klassischen temporalen Synchronisationsmechanismus im (Neo-)Konnektionismus nur in eingeschränkter Weise entspricht (Kap. 5.1.07), es variiert (Kap. 5.1.10) oder bestimmte Sonderfälle behandelt (Kap. 5.1.06).

5.13 Eine weitere konnektionistische (Neuro-)Architektur, die, basierend auf dem sog. “Simple Recurrent Network (SRN)” J.L. ELMAN's¹⁰⁵⁷, die Variablenbindung mit einem temporalen Synchronisationsmechanismus zu lösen versucht, stellt das sog. “Simple Synchrony Network (SSN)”¹⁰⁵⁸ von P.C.R. LANE und J.B. HENDERSON dar, auf die in der vorliegenden Arbeit aber nicht näher eingegangen werden kann.

1057 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1058 S. P.C.R. LANE / J.B. HENDERSON: Simple Synchrony Networks: Learning to Parse Natural Language with Temporal Synchrony Variable Binding. In: L.F. NIKLASSON / M. BODEN / T. ZIEMKE: ICANN 98. Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Neural Networks. Skövde, Sweden. 2-4 September 1998. Vol. 2. Springer. Berlin. 1998. PP. 615-20.

5.1.01 INTEGRATED CONNECTIONIST / SYMBOLIC COGNITIVE ARCHITECTURE NACH P. SMOLENSKY¹⁰⁵⁹

5.1.01.0 SUBSYMBOLISCHES PARADIGMA

Das sog. „Subsymbolische Paradigma“ (engl. „subsymbolic paradigm“)¹⁰⁶⁰ des U.S.-amerikanischen Physikers Paul SMOLENSKY¹⁰⁶¹, der in den achtziger Jahren des 20. Jhdts der sog. „PDP Research Group“¹⁰⁶² um die beiden U.S.-amerikanischen kognitiven Psychologen D.E. RUMELHART und J.L. McCLELLAND angehört hatte, wird in seinen Grundzügen bereits in seinem programmatischen Positionspapier „ON THE PROPER TREATMENT OF CONNECTIONISM (PTC)“¹⁰⁶³ aus dem Jahr 1988 sowie in darauf folgenden Artikeln als ein konnektionistisches Kognitionsmodell entworfen, und nun in seinem Hauptwerk, bestehend aus zwei Bänden: „THE HARMONIC MIND:

1059 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des Kapitels 5.61 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. 2006, 2009.

1060 Im Rahmen seiner Ameisenkolonie-Metapher findet sich der Ausdruck „subsymbolic“ zum ersten Mal in D.R. HOFSTADTER: *Metamagical Themes: Questing for the Essence of Mind and Pattern*. Basic Books. New York. 1985. P. 662, wo er bereits im Kontext zum Konnektionismus steht. Der Begriff „subsymbolic approach“ findet sich in P. SMOLENSKY: *The Constituent Structure of Connectionist Mental States: A Reply to Fodor and Pylyshyn*. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind*. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. 1988. P. 139 mit bezug auf die grundlegende Darstellung des „subsymbolic paradigm“ in P. SMOLENSKY: *On the Proper Treatment of Connectionism*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. 1988. P. 3, desweiteren in P. SMOLENSKY: *Putting together Connectionism – again*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. P. 63 und in P. SMOLENSKY: *Connectionist Modeling: Neural Computation / Mental Connections*. In: J. HAUGELAND (Ed.): *Mind Design II. Philosophy – Psychology – Artificial Intelligence*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1997 P. 235.

Eine allgemeine Einführung in das Subsymbolische Paradigma bietet z.B. A. CLARK: *Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change*. The MIT Press. Cambridge/ MA, London. 1993. PP. 18, 24-26, 29, 47-48, 61-62, 82, 99, 102, 118-19, 154, 168.

1061 Zur Person Paul SMOLENSKY's siehe die Website <http://www.cog.jhu.edu/faculty/smolensky/>.

1062 Zur PDP Research Group s. z.B. D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1: Foundations. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986.

1063 S. P. SMOLENSKY: *On the Proper Treatment of Connectionism*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 2, 3: "(...) let me call the formulation of the connectionist approach that I will offer PTC. (...) I want to argue here that PTC offers a ‚Proper Treatment of Connectionism‘: a coherent formulation of the connectionist approach that puts it in contact with other theory in cognitive science in a particularly constructive way. (...)

(...) I will call the paradigm for cognitive modeling proposed by PTC the subsymbolic paradigm." Siehe auch die Erwiderung P. Smolensky's auf den "Open Peer Commentary" in P. SMOLENSKY: *Putting together Connectionism – again*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 59-74.

Eine leicht verständliche Einführung in die PTC-Version des Subsymbolischen Paradigmas bieten z.B. G. DORFFNER: *Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI*. B.G. Teubner. Stuttgart. 1991. S. 144-64.

FROM NEURAL COMPUTATION TO OPTIMALITY-THEORETIC GRAMMAR"¹⁰⁶⁴ aus dem Jahr 2006 zu einer sog. „Integriert Konnektionistisch / Symbolistischen Kognitiven Architektur“ (engl. “Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture (ICS)”) weiterentwickelt.

Vor dem Hintergrund der seit der Mitte der achtziger Jahre des 20. Jhdts. geführten sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. “Connectionist/Classical Debate”)¹⁰⁶⁵ erhebt Paul SMOLENSKY, der prominenteste Protagonist des Konnektionismus, den Anspruch, mit seinem Subsymbolischen Paradigma den Status einer alternativen Theorie der Kognition zu erlangen, wobei die zentrale Problematik darin besteht, ob und inwieweit das Konzept der internen mentalen Repräsentation¹⁰⁶⁶ im Sinne der klassischen Symboltheorie auf das konnektionistische Modell angewendet werden kann.¹⁰⁶⁷ Während nun in der sog. „symbolorientierten Klassischen Künstlichen Intelligenz“, dem Symbolismus¹⁰⁶⁸, Repräsentationen als syntaktisch strukturierte Symbole betrachtet werden, wird in der sog. „subsymbolorientierten ‚Neu(-er-)en‘ Künstlichen Intelligenz“, dem (Neo-)Konnektionis-

1064 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 63-95, 100-19, 145-390 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: *Linguistic and Philosophical Implications*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 473-98, 503-90.

Die sog. „ICS-Architektur“ wird von P. SMOLENSKY erstmals in seinem Artikel P. SMOLENSKY: *Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture*. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. PP. 223-90 publiziert.

S. auch P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE / Y. MIYATA: *Principles for an Integrated Connectionist / Symbolic Theory of Higher Cognition*. Technical Report CU-CS-600-92, Department of Computer Science and 92-8, Institute of Cognitive Science. University of Colorado at Boulder. 1992. PP. 1-7 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE / Y. MIYATA: *Integrating Connectionist and Symbolic Computation for the Theory of Language*. In: V. HONAVAR / L. UHR (Eds.): *Artificial Intelligence and Neural Networks: Steps toward Principled Integration*. Academic Press. San Diego/CA, London. 1994. PP. 509-30.

1065 Eine Einführung hierzu bieten z.B. C. ELIASMITH / W. BECHTEL: *Symbolic versus Subsymbolic*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 288-95 – T. HORGAN / J. TIENSON: *A Nonclassical Framework for Cognitive Science*. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 305-45 – M.G. DYER: *Connectionism versus Symbolism in High-Level Cognition*. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 382-416 – J. DINSMORE: *Thunder in the Gap*. In: J. DINSMORE (Ed.): *The Symbolic and Connectionist Paradigms: Closing the Gap*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 1-23 – T. VADÉN: *The Symbolic and Subsymbolic Theories in Cognitive Science*. Tampereen Yliopisto. Tampere/Finnland. 1996.

1066 Zum Begriff der mentalen Repräsentation s. z.B. B. von ECKARDT: *Mental Representation*. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 527-29.

1067 Zur Repräsentationalitätsproblematik siehe Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: *Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten*. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): *Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung*. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 65-108.

1068 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.1.

mus¹⁰⁶⁹, der Begriff der klassischen Repräsentation auf dynamische künstliche neuronale Netzwerke aus der Neuroinformatik angewendet.¹⁰⁷⁰ Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen dem Symbolismus und dem Konnektionismus bildet dabei die jeweilige modelltechnische Realisation von Information(-sverarbeitung)¹⁰⁷¹, m.a.W. die Beantwortung der Frage: Wie funktioniert die intelligente Informationsverarbeitung bzw. Kognition beim Menschen?¹⁰⁷²

Ausgehend von der Grundannahme in der modernen Kognitionswissenschaft, daß Kognition Berechnung (engl. "computation")¹⁰⁷³ sei, stellt sich nun für P. SMOLENSKY die grundlegende Frage, welche Art von Berechnung im menschlichen Gehirn bzw. Geist stattfindet, m.a.W. welcher Typ von kognitiver Architektur vorzuziehen ist?¹⁰⁷⁴

5.1.01.1 SYMBOLISMUS VS. KONNEKTIONISMUS DEBATTE

5.1.01.11 Der Kern der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte besteht nun aus folgendem Disput: Das Subsymbolische Paradigma P. SMOLENSKY's müßte der (Heraus-)Forderung J.A. FODOR's und Z.W. PYLYSHYN's (engl. "FODOR/PYLYSHYN – Challenge")¹⁰⁷⁵ begegnen, die die klassische Symbol-

1069 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.2.

1070 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.

1071 S. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 74.

1072 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.13 a.E..

1073 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.11, Fn. 7.

1074 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 5.

1075 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 4-50.

Darauf Bezug nehmend J.A. FODOR / Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work. Cognition. Vol. 35. 1990. PP. 183-84: "(...) Paul Smolensky responds to a challenge Jerry Fodor and Zenon Pylyshyn (...) have posed for connectionist theories of cognition: to explain the existence of systematic relations among cognitive capacities without assuming that cognitive processes are causally sensitive to the constituent structure of mental representations. This challenge implies a dilemma: if connectionism can't account for systematicity, it thereby fails to provide an adequate basis for a theory of cognition; but if its account of systematicity requires mental processes that are sensitive to the constituent structure of mental representations, then the theory of cognition it offers will be, at best, an implementation architecture for a 'classical' (language of thought) model."

Weitere Umschreibungen der "FODOR/PYLYSHYN-Challenge" sind zu finden in Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to win Souls. Philosophical Studies. Vol. 71. 1993. PP. 171-72 und Br.P. McLAUGHLIN: Systematicity, Conceptual Truth, and Evolution. In: Chr. HOOKWAY / D. PETERSON (Eds.): Philosophy and Cognitive Science. Cambridge University Press. 1993. PP. 217-18, der darauf hinweist, daß es neben P. SMOLENSKY's Position auch solche in der Literatur gibt, die die Adäquatheitsbedingungen J.A. FODOR's und Z.W. PYLYSHYN's für eine kognitive Theorie ablehnen, insbesondere die Bedingung, daß eine adäquate Theorie der Kognition das Prinzip der Systematizität zu erklären habe.

S. hierzu einleitend auch B. von ECKARDT: Cognitive Science: Philosophical Issues. In: L. NADEL

theorie für eine konnektionistische Theorie der Kognition aufgestellt hat, nämlich, um eine adäquate alternative Kognitionstheorie zu sein, hätte P. SMOLENKY's Subsymbolisches Paradigma die Existenz von Systematizität bzw. von systematischen Relationen in kognitiven Leistungen zu erklären, ohne – wie die klassische Symboltheorie – annehmen zu können, daß kognitive Prozesse kausal sensitiv (engl. "causally sensitive") in bezug auf die klassische Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen sind, m.a.W. ohne sich auf eine bloße Implementation einer klassischen kognitiven Architektur zu stützen. Diese Forderung impliziert ein Dilemma: Falls das Subsymbolische Paradigma keinen Beitrag zur Systematizität leisten könnte, mangelt es ihm daran, eine angemessene Grundlage für eine alternative Theorie der Kognition bereitzustellen, jedoch, falls sein Beitrag zur Systematizität mentale Prozesse erfordert, die sensitiv in bezug auf die klassische Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen sind, würde die Theorie der Kognition, die es anbietet, bestenfalls eine Implementationsarchitektur für ein klassisches Modell der Symboltheorie sein.

5.1.01.12 Die generelle Struktur von J.A. FODOR's und Z.W. PYLYSHYN's Standardargumentation¹⁰⁷⁶, wonach das klassische symbolorientierte Modell charakterisiert ist durch (1) eine „kombinatorische Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen“ (engl. "combinatorial syntax and semantics for mental representations")¹⁰⁷⁷ und (2) durch mentale Operationen im Sinne von „struktursensitiven Prozessen“ (engl. "structure sensitivity of pro-

(Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 557-58 – R J. MATTHEWS: Connectionism and Systematicity. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. PP. 687-90 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 513.

1076 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 33-50.

1077 Nach J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 12-13 hat man eine kombinatorische Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen zu postulieren, da sonst bestimmte Eigenschaften von propositionalen Einstellungen nicht erklärbar wären, und definieren sie wie folgt:

(1.1) „Es gibt eine Unterscheidung zwischen strukturell atomaren und strukturell molekularen Repräsentationen.“

(1.2) „Die strukturell molekularen Repräsentationen bestehen aus syntaktischen Konstituenten, die selbst wieder entweder strukturell molekular oder strukturell atomar sind.“

Die ersten beiden Bedingungen bezeichnen sie zumeist als die Forderung nach einer (syntaktischen) Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen.

(1.3) „Der semantische Inhalt einer (molekularen) Repräsentation ist eine Funktion der semantischen Inhalte ihrer syntaktischen Teile, zusammen mit ihrer Konstituentenstruktur.“

Die dritte Bedingung bezeichnen die Autoren zumeist als die Forderung nach einer kompositionalen Semantik.

cesses")^{1078,1079}, besteht nun darin, daß, basierend auf diesem Fundamentalprinzip der sog. „(syntaktischen und semantischen) Konstituentenstruktur von mentalen Repräsentationen“ (engl. “constituent structure of mental representations”)¹⁰⁸⁰, die folgenden eng miteinander verbundenen Eigenschaften der menschlichen Kognition erklärt werden könne, u.z. ihre (1) Produktivität, (2) Systematizität, (3) Kompositionalität und (4) ihre inferentielle Kohärenz.¹⁰⁸¹

5.1.01.2 INTEGRATED CONNECTIONIST / SYMBOLIC (ICS) COGNITIVE ARCHITECTURE NACH PAUL SMOLENSKY

5.1.01.20 Die grundlegende Ausgangsfrage wieder aufgreifend, welche Berechnungsweise die menschliche Kognition zutreffender darstelle, entweder die die Verarbeitungsweise des Gehirns beschreibende, numerische

1078 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 13.

Das klassische kognitionswissenschaftliche Konzept eines struktursensitiven Prozesses stellt z.B. die Schlußfolgerung dar, die sog. „logische Inferenz“ (engl. “logical inference”).

S. hierzu einführend z.B. A. BECKERMANN: Analytische Einführung in die Philosophie des Geistes. 3. Aufl. De Gruyter. Berlin u.a. 2008. S. 284-92.

1079 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. P. 13 betrachten (1) und (2) als die Anforderungen, die ein Klassisches Kognitionsmodell definiert, d.h. sie beschränken (engl. “constrain”) die physikalischen Realisationen von Symbolstrukturen im Sinne eines physikalischen Symbolsystems nach A. NEWELL.

1080 S. Fn. 1078.

Unter einer sog. „Konstituente“ (engl. “constituent”) versteht man dabei in der Linguistik diejenigen (Satz-)Bestandteile, in die sich eine syntaktische (De-)Konstruktion sinnvoll zerlegen läßt, d.h. die in seiner Gesamtheit untereinander ersetzbar (Substitutionstest), umstellbar (Permutationstest), wegläßbar (Deletionstest) und zusammenstellbar (Koordinationstest) sind, sodaß sich z.B. ein Satz nicht unmittelbar in Wörter zerlegen läßt, sondern zunächst in Wortgruppen, in die sog. „Phrasen“, die somit die Konstituenten darstellen.

S. hierzu z.B. J. MEIBAUER: Einführung in die germanistische Linguistik. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verl. Stuttgart u.a. 2002. S. 125-28 – G. GREWENDORF / Fr. HAMM / W. STERNEFELD: Sprachliches Wissen. Eine Einführung in moderne Theorien der grammatischen Beschreibung. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1993. S. 156-65 – H. VATER: Einführung in die Sprachwissenschaft. 4. Aufl. Wilhelm Fink Verl. München. 2002. S. 107-13 – W. O'GRADY: Syntax: The Analysis of Sentence Structure. In: W. O'GRADY / M. DOBROVOLSKY / Fr. KATAMBA: Contemporary Linguistics. An Introduction. 3rd Ed. Addison Wesley Longman. Harlow u.a. 1997. PP. 193-94.

Unter einer sog. „Konstituente“ (engl. “constituent”) versteht man dabei in der (mathematischen) symbolischen Logik diejenigen syntaktischen Elemente (engl. “syntactical units”) einer prädikatenlogischen Sprache (erster Stufe) i.S. der modernen Prädikatenlogik, die aufgrund des Alphabets einer Sprache als Term (engl. “term”) bzw. als Formel (engl. “formula”) im Rahmen eines Kalküls zulässig sind.

S. hierzu auch z.B. W.V.O. QUINE: Mathematical Logic. Harvard University Press. Cambridge/MA. (1940) 1976 – W.V.O. QUINE: Philosophy of Logic. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1970 – Fr. SOMMERS: Predication in the Logic Terms. Notre Dame Journal of Formal Logic. Vol. 31. 1989. PP. 106-26 – W. STEGMÜLLER / M. VARGA VON KIBÉD: Strukturtypen der Logik. Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Teil III. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1984 – A. BECKERMANN: Analytische Einführung in die Philosophie des Geistes. 3. Aufl. De Gruyter. Berlin u.a. 2008. S. 284-92.

1081 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14.

kognitive Architektur des Konnektionismus (engl. "brain-as-numerical-computer"), oder die die Verarbeitungsweise des Geistes beschreibende, symbolische kognitive Architektur des Symbolismus (engl. "mind-as-symbolic-computer"), nimmt P. SMOLENSKY¹⁰⁸² eine vermittelnde Position ein: Im Rahmen einer Gesamtbetrachtung der menschlichen Kognition ist das Gehirn bzw. der Geist ein und dasselbe komplexe System, das auf einer niedrigeren formalen Beschreibungsebene – bezogen auf die biophysikalische – ein massiv paralleler, numerischer „Computer“ ist, und zugleich, auf einer höheren Beschreibungsebene ein regelbeherrschter traditioneller „Computer“ von diskreten Symbolstrukturen ist, wobei die Verbindung dieser beiden Beschreibungen mit mathematischer Präzision angegeben werden könne – in Analogie zum Verhältnis von klassischer und statistischer Thermodynamik.

Aus diesem Grund entwickelt P. SMOLENSKY¹⁰⁸³ seine sog. "Integrated Connectionist / Symbolic (ICS) Cognitive Architecture" (dt. „Integrative Konnektionistisch-Symbolische Kognitive Architektur“, im weiteren als „ICS-Architektur“ bezeichnet), erstmals publiziert in seinem Aufsatz "REPLY: CONSTITUENT STRUCTURE AND EXPLANATION IN AN INTEGRATED CONNECTIONIST / SYMBOLIC COGNITIVE ARCHITECTURE" aus dem Jahr 1994¹⁰⁸⁴, deren entscheidendes Charakteristikum darin besteht, daß die Repräsentationen entweder einer funktional-relevanten oder einer prozessual-relevanten Analyseverfahren unterzogen werden können: Nur im Rahmen der funktionalen Analyseverfahren werden dabei, wie in der Symboltheorie, die symbolstrukturierten Repräsentationen in ihre Konstituenten zerlegt, sodaß anhand der kombinatorischen Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen und anhand von struktursensitiven Prozessen die Produktivität der Kognition erklärt werden kann, wohingegen im Rahmen der prozessualen Analyseverfahren die Repräsentationen nicht, wie in der Symboltheorie, in einem seriellen, Konstituent für Konstituent verarbeitenden Prozeß mittels symbolischer Algorithmen abgearbeitet werden, vielmehr erfordert die von Moment zu Moment wirkende, kausale Dynamik der Kognition konnektionistische Algorithmen, die eine Repräsentation nicht in ihre Konstituenten, sondern in ihre prozessual-relevanten vektorialen Aktivierungswerte und Aktivierungsmuster von abstrakten Neuronen und in deren numerisch gewichteten Verbindungen der abstrakten Synapsen zerlegen, sodaß Lernen als die Bestimmung der passenden Gewichte der Konnektionsmatrix über

1082 P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 31-33.

1083 P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 33-36 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 503-90.

1084 Zit. nach P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. PP. 223-90.

eine statistische Analyse des erfahrungsabhängigen Datenmaterials interpretiert werden kann.

Die grundlegende Arbeitshypothese der ICS-Architektur¹⁰⁸⁵, wonach „Kognition eine massiv parallele numerische Berechnung darstellt, wobei einige ihrer Dimensionen derart organisiert sind, daß entscheidende Facetten der symbolischen Berechnung realisiert werden“¹⁰⁸⁶, wird nun in folgende vier ICS-Subhypothesen zerlegt, die zugleich die vier Prinzipien der ICS-Theorie darstellen:

5.1.01.21 Das erste ICS-Prinzip behandelt die Integration von symbolischer und konnektionistischer Form(-alisierung) von mentalen Repräsentationen, u.z. die zentrale Problematik der Relation der beiden Repräsentationstypen.

5.1.01.211 Das erste ICS-Prinzip lautet nun informell wie folgt¹⁰⁸⁷:

P₁. Rep_{ICS}: Kognitive Repräsentationen in der ICS-Architektur

Die Informationsverarbeitung erfolgt in der ICS-Architektur dadurch, daß eine Information anhand von weit verteilten (engl. “widely distributed”) Aktivierungsmustern in Form von Vektoren repräsentiert wird, die, in zentralen Aspekten der höheren Kognition, eine globale Struktur besitzen, die durch diskrete Symbole und Symbolstrukturen der symbolischen Kognitionstheorie beschrieben werden können, m.a.W. die Vektoren realisieren die Symbolstrukturen i.S. eines mathematischen Isomorphismus.¹⁰⁸⁸

5.1.01.212 Dabei stellt sich diese globale Struktur bei komplexeren konnektionistischen Repräsentationen formal wie folgt dar¹⁰⁸⁹:

Sofern man mehrere Symbole zu einer unstrukturierten Menge von Elementen (engl. “unstructured collection¹⁰⁹⁰ of elements”) zusammenfaßt, erfolgt

1085 P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 46: “At a lower level of analysis, the mind/brain is a computer with a connectionist architecture. Parts of this architecture are organized so that they give rise, at a higher level of analysis, to a virtual machine with a (perhaps novel type of) symbolic architecture. In higher cognitive domains where symbolic theory has been successful, this symbolic architecture governs central aspects of the phenomena.”

1086 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 65 mit Verweis auf P. 46 stellt die Kurzfassung der Arbeitshypothese dar.

1087 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 65, 159.

Vgl. hierzu auch das Prinzip Rep_{pdp} in P. SMOLENSKY: *Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture*. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. P. 224.

1088 Zur Unterscheidung von „Repräsentation“ und „Realisation“ s. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 66.

1089 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 66-67, v.a. PP. 159-92.

1090 Das englische Wort “collection” bedeutet in der wörtlichen Übersetzung eigentlich „Ansammlung, Anhäufung“, wird aber in Anbetracht des mathematischen Kontextes mit dem zutreffende-

diese Kombination von Konstituenten (engl. "constituent combination") anhand einer Musterüberlagerung (engl. "pattern superposition") unter Verwendung der Vektoradditionsoperation von Aktivierungsmustern¹⁰⁹¹ (sog. „Superpositionsprinzip“ (engl. "Superposition Principle")).¹⁰⁹²

5.1.01.213 Sofern man nun aber mehrere Symbole zu einer komplexeren Symbolstruktur zusammensetzt, z.B. zu einer Symbolsequenz bzw. einem Symbolstring, hat man die unterschiedliche syntaktische Position bzw. (strukturelle) Rolle in der Gesamtstruktur zu berücksichtigen, die ein Symbolvorkommnis (engl. "symbol token") einnehmen kann.¹⁰⁹³ Solch eine komplexere Symbolstruktur s ist demnach definiert durch eine Menge von strukturellen Rollen $\{r_i\}$ als Variablen, die, für einzelne Instanzen der Struktur, individuell gebunden sind an einzelne Füller $\{f_i\}$ als Werte, die die Struktur damit individuieren.³³ M.a.W. kann eine Zeichenkette betrachtet werden als besäße sie eine Menge von Rollen $\{r_1, r_2, \dots\}$, wobei r_i die Rolle des i -ten Elements in der Zeichenkette ist. Eine einzelne Zeichenkette der Länge n zieht die Bindung der ersten n Rollen an einzelne Füller nach sich, z.B. zieht die Zeichenkette 'aba' die Bindungen $\{a/r_1, b/r_2, a/r_3\}$ nach sich, eine Notation benutzend, in der f/r die Bindung der Instanz bzw. des Füllers f an die syntaktische Position bzw. die Rolle r bezeichnet.¹⁰⁹⁴ Die Symbolstruktur s besteht also aus einer Menge von (Symbol-)Konstituenten, denen jeweils eine sog. „Füller/Rolle-Bindung“ (engl. "filler/role binding") $\{f_i/r_i\}$ entspricht.¹⁰⁹⁵ Diese Füller/Rolle-Bindung f/r wird nun realisiert anhand eines (Bindungs-)Vektors $\mathbf{b} = \mathbf{f}/\mathbf{r}$, bestehend aus dem Tensorprodukt¹⁰⁹⁶ des (Fül-

ren Begriff „Menge“ übersetzt.

1091 Die Aktivierungsvektoren, die die atomaren Symbole realisieren, sind dabei linear unabhängig. S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 164.

1092 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 160-65.

1093 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 66, 165-82.

1094 S. P. SMOLENSKY: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. P. 169.

Sowohl der Füller- als auch der Rollenvektor sind dabei in der Regel Vektoren im Sinne des sog. „völlig verteilten subsymbolischen Repräsentationstyps“.

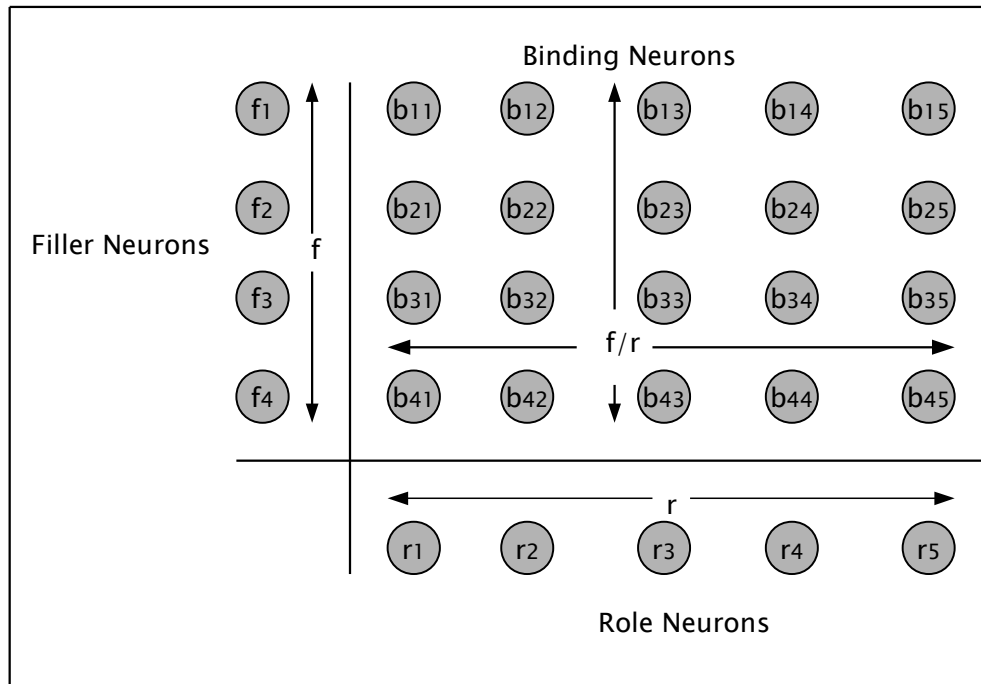
Siehe hierzu die Ausführungen in Fn. 379 und in Kap. 2.222.4.

1095 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 168.

1096 Zum sog. „Tensorprodukt“ s. z.B. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 69-71, v.a. PP. 154-55, 170, 176 mit einem einfachen Rechenbeispiel.

Weitere Beispiele befinden sich in P. SMOLENSKY: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 173, 174, 175, 179, 181, 183, in P. SMOLENSKY: Computational Models of Mind. In: S. GUTTENPLAN

ler-)Vektors \mathbf{f} , der einen sog. „Füller“ (engl. “filler”) f realisiert, mit dem (Rollen-)Vektor \mathbf{r} , der eine sog. „Rolle“ (engl. “role”) r realisiert, also $\mathbf{b} = \mathbf{f}/\mathbf{r} = \mathbf{f} \otimes \mathbf{r}$, sodaß die konnektionistische Realisation einer Symbolstruktur s einem



Graphik.33: Die Tensorprodukt-Repräsentation (engl. “Tensor Product Representation”) für eine Füller/Rolle-Bindung bestehend aus 4 Füllerneuronen (engl. “filler neurons”), 5 Rollen-Neuronen (engl. “role neurons”) und demzufolge $4 \times 5 = 20$ Bindungsneuronen (engl. “binding neurons”) (angelehnt an P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 281 und P. SMOLENSKY: *Tensor Product Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems*. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. P. 173).

(Ed.): *A Companion to the Philosophy of Mind*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. P. 178 und in J.P. SOUGNÉ: *Binding Problem*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 377.

S. einführend auch T.A. PLATE: *Distributed Representations and Nested Compositional Structure*. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. P. 52.

Zur Definition eines sog. „Tensors“ s. z.B. Chr.B. LANG / N. PUCKER: *Mathematische Methoden in der Physik*. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg, Berlin. 1998. S. 327-30.

In kartesischen Koordinaten läßt sich das Tensorprodukt wie folgt berechnen:

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \otimes \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \otimes (b_x, b_y, b_z) = \begin{pmatrix} a_x b_x & a_x b_y & a_x b_z \\ a_y b_x & a_y b_y & a_y b_z \\ a_z b_x & a_z b_y & a_z b_z \end{pmatrix}, \quad (93)$$

d.h. jede Vektorkomponente des (Füller-)Vektors \mathbf{a} wird mit jeder Vektorkomponente des (Rollen-)Vektors \mathbf{b} multipliziert, wobei jeweils eine Vektorkomponente ein Neuron darstellt.

Aktivierungsvektor

$$\mathbf{s} = \sum_i \mathbf{f}_i \otimes \mathbf{r}_i \quad (94)$$

entspricht, bestehend aus der Summe der (Bindungs-)Vektoren i.S. einer Vektoraddition, die die Füller/Rolle-Bindungen realisieren, sofern man die Symbolstruktur s mit der Konjunktion der Bindungen, die sie enthält, identifiziert (s. Graphik.33).¹⁰⁹⁷

Diese sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. „Tensor Product Representation (TPR)“) als ein vollständig verteiltes subsymbolisches Repräsentationsschema¹⁰⁹⁸ für die Variablenbindung wird von P. SMOLENSKY in grundlegender Weise bereits in seinem Artikel: „TENSOR PRODUCT VARIABLE BINDING AND THE REPRESENTATION OF SYMBOLIC STRUCTURES IN CONNECTIONIST SYSTEMS“¹⁰⁹⁹ im Jahr 1990 und in verschiedenen anderen Publikationen¹¹⁰⁰ behandelt.

1097 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 66, 165-70, 188.

1098 S. P. SMOLENSKY: *Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems*. *Artificial Intelligence*. Vol. 46. 1990. PP. 161-63, 164: "In the tensor product representation, both the variables and the values can be arbitrarily, enabling (but not requiring) representations in which every unit is part of the representation of every constituent in the structure."

Zum Begriff des „völlig“ oder „vollständig verteilten subsymbolischen Repräsentationsschemas“ siehe die Ausführungen in Fn. 358 und in Kap. 2.222.4.

1099 S. P. SMOLENSKY: *Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems*. *Artificial Intelligence*. Vol. 46. 1990. PP. 159-216, v.a. PP. 167-76. Eine kurze Einführung hierzu bietet z.B. J.P. SOUGNÉ: *Binding Problem*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 377 – J. PETITOT: *Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis*. *Sémiotiques*. Vol. 6. 1994. PP. 214-16 – J. PETITOT: *Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax*. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 183-204.

S. auch Bj.Chr. KRALEMANN: *Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze*. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 105-107.

1100 S. P. SMOLENSKY: *On Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems*. Technical Report CU-CS-355-87. Department of Computer Science. University of Colorado / Boulder. 1987. PP. 355-87, der beinahe inhaltsgleich ist mit P. SMOLENSKY: *Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems*. *Artificial Intelligence*. Vol. 46. 1990. PP. 159-216 – P. SMOLENSKY: *A Method for Connectionist Variable Binding*. In: Technical Report CU-CS-356-87. University of Colorado. Department of Computer Science. Boulder. 1987. PP. 1-10 – Ch.P. DOLAN / P. SMOLENSKY: *Implementing a Connectionist Production System Using Tensor Products*. In: D. TOURETZKY / G. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 265-72 – Ch.P. DOLAN / P. SMOLENSKY: *Tensor Product Production System: A Modular Architecture and Representation*. *Connection Science*. Vol. 1. 1989. PP. 53-68 – B.B. TESAR / P. SMOLENSKY: *Synchronous Firing Variable Binding is a Tensor Product Representation with Temporal Role Vectors*. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 870-75 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 69-71, 165-202,

5.1.01.214 Entscheidend ist nun, daß jeder Bindungsvektor mit Hilfe seines Rollenvektors eine exakte syntaktische Position im gesamten Aktivierungsvektor \mathbf{s} kodiert, die der Position einer Symbolkonstituenten in einem binären Parserstrukturbaum entspricht¹¹⁰¹, wodurch nach der Meinung P. SMOLENSKY's ein eigenständiger Typ einer subsymbolischen Systematizität gewährleistet wäre.¹¹⁰² M.a.W., wenn r_{x_i} die syntaktische oder positionale (engl. "positional") Rolle in einem binären Parserstrukturbaum mit den Knoten x_i definiert, so wird der Baum s mit dem atomaren Füller f_i am Knoten x_i durch das Tensorprodukt

235-67, 271-342.

1101 Nach P. SMOLENSKY: Connectionism, Constituency, and the Language of Thought. In: B. LOEWER / G. REY (Eds.): Meaning in Mind. Fodor and his Critics. Blackwell. Cambridge/MA, Oxford/UK. 1991. PP. 225-26, Fn. 7 kann das Tensorprodukt-Repräsentationsschema in Analogie zur sog. „Gödelisierung“ oder „Gödelnummer-Kodierung“ verstanden werden, wonach eine formale Struktur, z.B. eine Grammatik oder eben eine Symbolstruktur, auf eine Gödelnummer, d.h. auf eine natürliche Zahl abgebildet wird, aus der dann die Struktur wieder eindeutig rekonstruiert werden kann: Einer Konkatenation von Symbolen, einem sog. „String“ (dt. svw. „Zeichenkette“) (engl. "string"), z.B. 'ab ...x...' wird also eine Nummer $s = p_1^a p_2^b \dots p_i^x \dots$ zugewiesen, wobei jedem Symbol in dem Alphabet 'a, b, ..., x, ...' in eindeutiger Weise ein Ganzzahlcode a, b, \dots, x, \dots zugewiesen wird, und im Rahmen der Primzahlkodierung jede mögliche Position i im String einer bestimmten Primzahl p_i entspricht, sodaß, auf Grund der eindeutigen Primzahlfaktorzerlegung von natürlichen Zahlen, jeweils das i -te Symbol des Strings effektiv rekonstruiert werden kann. Im Tensorprodukt-Schema wird dieser String nun anhand eines (Kompositums-)Vektors

$$s = p_1 \otimes a + p_2 \otimes b + \dots p_i \otimes x + \dots \quad (95)$$

repräsentiert, wobei jedes Symbol, anstatt einer Zahl, durch den betreffenden (Füller-)Vektor, bestehend aus Aktivierungswerten, kodiert wird, und jede syntaktische Position i , anstatt einer Primzahl, durch den betreffenden (Rollen-)Vektor p_i , bestehend aus Aktivierungswerten, kodiert wird, sodaß aus dem (Kompositums-)Vektor s , sofern die (Rollen-)Vektoren $\{p_i\}$ linear unabhängig sind, die (Konstituenten-)Vektoren $\{p_i \otimes x\}$ in eindeutiger Weise rekonstruiert werden können. Um somit vom Gödel-Schema zum Tensorprodukt-Repräsentationsschema zu gelangen, ersetzt man also die Zahlen durch Vektoren, die Exponentiation, die die Bindung eines Symbols an seine jeweilige syntaktische Position gewährleistet, durch das Tensorprodukt, das nun ebenfalls dazu dient, die Bindung eines Füllervektors an seine jeweilige syntaktische Position, kodiert durch den entsprechenden linear unabhängigen Rollenvektor, in eindeutiger Weise vorzunehmen, und die Multiplikation, die die Verknüpfungen der Symbol/Positions-Bindungen vornimmt, ersetzt man durch die Vektoraddition, die nun entsprechend die Bindungen aus Füller- und Rollenvektoren miteinander verknüpft.

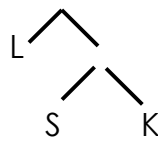
Zur Gödelnummer-Kodierung s. z.B. K. AIZAWA: The Systematicity Arguments. Kluwer. Academic Publishers. Boston u.a. 2003 mit sehr vielen Beispielen – T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. No. 3. 1990. PP. 361-63
Einführend zur Gödelnummer-Kodierung s. z.B. K. ERK / L. PRIESE: Theoretische Informatik. Eine umfassende Einführung. Springer Verl. Berlin u.a. 2000. S. 204-205, 262-63.

1102 S. P. SMOLENSKY: Connectionism, Constituency, and the Language of Thought. In: B. LOEWER / G. REY (Eds.): Meaning in Mind. Fodor and his Critics. Blackwell. Cambridge/MA, Oxford/UK. 1991. PP. 213, 214: "(...) we can identify the representations of each constituent as a *role-dependent* representation built in a systematic way (through tensor product variable binding) from a *role-in-dependent* representation of the filler and a filler-independent representation of its role. (...)

But have we merely provided an implementation then of a symbolic language of thought? In general, the answer is 'no'."

$$\mathbf{s} = \sum_i \mathbf{f}_i \otimes \mathbf{r}_{x_i} \quad (96)$$

repräsentiert, wobei – die LISP-Konvention mit den Funktionen 'car' und 'cdr' übernehmend – die rekursive Struktur des binären Parserstrukturbaums dadurch konstruiert wird, daß die Position eines Knotens nur durch zwei Rollen kodiert wird, u.z. r_0 für den linken Unterbaum und r_1 für den rechten Unterbaum, sodaß sogar Füller dargestellt werden können, die selbst wiederum eine komplexere Struktur besitzen.¹¹⁰³ Dies wird nun von P. SMOLENSKY¹¹⁰⁴ an einem Beispiel erläutert: Die Aussage 'Sandy loves Kim' kann – der LISP-Konvention folgend – anhand der folgenden symbolischen Repräsentation dargestellt werden:



Dieser Baum wird nun durch den Ausdruck $[L, [S, K]]$ wiedergegeben¹¹⁰⁵, und wird in der Prädikatenkalkülnotation abgekürzt ausgedrückt durch $L(S, K)$, wobei das atomare Symbol 'L' den zweistelligen Relator bezeichnet, der das Verb "loves" repräsentiert, und die atomaren Symbole 'S' und 'K' jeweils die beiden Individuenkonstanten bezeichnen, die das Subjekt 'Sandy' und das Objekt 'Kim' des Satzes repräsentieren.

Die Proposition¹¹⁰⁶ $p = [L, [S, K]]$ spiegelt sich (engl. "mirrors") nach P. SMOLENSKY genau in dem folgenden konnektionistischen (Kompositums-)Vektor wider

$$\mathbf{p} = \mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{L} + \mathbf{r}_1 \otimes [\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{S} + \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{K}], \quad (97)$$

wobei die beiden (Rollen-)Vektoren \mathbf{r}_0 und \mathbf{r}_1 , sofern sie linear unabhängige Basisvektoren sind, die exakte syntaktische Position der entsprechenden (Füller-)Vektoren, hier \mathbf{L} , \mathbf{S} und \mathbf{K} , in Analogie zur Position der Symbole

1103 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 182-87, 300-42. S. auch J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. P. 216.

1104 S. P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. PP. 236-39.

1105 Die traditionelle LISP – Notation für diese Symbolstruktur würde eigentlich lauten: $(L . (S . K))$.

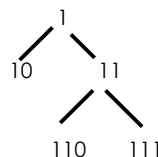
1106 Der Begriff „Proposition“ wird hier i.S.v. „Aussage“ oder „Ausdruck“ gebraucht.

'L', 'S' und 'K' im Baum, bestimmen^{1107,1108}, u.z. im Rahmen des Tensorprodukts, wonach bei einer Verzweigung des Baumes der Vektor, der die Konstituente im linken Teilbaum repräsentiert, hier der Vektor \mathbf{L} , an den (Rollen-)Vektor \mathbf{r}_0 gebunden wird, der festlegt, daß sich der daraus entstehende Konstituentenvektor $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{L}$ im Baum nach links verzweigt, m.a.W. der Vektor \mathbf{r}_0 repräsentiert die „linke Zweig-Rolle“. Dementsprechend wird der komplexere (Füller-)Vektor, hier $[\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{S} + \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{K}]$, der den rechten Teilbaum [S, K] repräsentiert, an den (Rollen-)Vektor \mathbf{r}_1 gebunden, der festlegt, daß sich der daraus entstehende komplexere Konstituentenvektor, hier $\mathbf{r}_1 \otimes [\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{S} + \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{K}]$, im Baum nach rechts verzweigt, m.a.W. der Vektor \mathbf{r}_1 repräsentiert die „rechte Zweig-Rolle“. Beide Konstituentenvektoren kann man dann mittels der Vektoraddition¹¹⁰⁹ zum kompositionalen Vektor \mathbf{p} ver-

1107 S. P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. P. 237: "The two vectors \mathbf{r}_0 and \mathbf{r}_1 are the fundamental building blocks in terms of which the representations for all positios in binary trees are recursively defined (...). Obviously, it will not do for \mathbf{r}_0 and \mathbf{r}_1 to be one and the same vector; we would have no way of distinguishing left from right in that case. Indeed, since we are working in a vector space, what is required is that \mathbf{r}_0 and \mathbf{r}_1 be independent as vectors (...)."

1108 S. P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. PP. 242-44 konstruiert dabei den binären Parserstrukturbaum derart, daß jedes Symbol S_k anhand einer Nummer k kodiert wird, und jede mögliche syntaktische Position im Baum durch eine Primzahl, wobei der Wurzelknoten mit der Dualzahl '1' vorinitialisiert wird, die der 1. Primzahl '2' für die erste Position im Baum entspricht und danach, anhand der entsprechenden (Rollen-)Vektoren \mathbf{r}_0 und \mathbf{r}_1 , die jeweils eine Verzweigung nach links bzw. rechts vorschreiben, sind die weiteren Positionen im Strukturbaum dadurch festgelegt, indem der jeweilige Index der Rollenvektoren, '0' oder '1', als Dualzahl gelesen, der bisherigen Dualzahl von rechts angefügt wird, z.B. entsteht aus der Dualzahl '1' im Wurzelknoten bei einer Verzweigung nach links die Dualzahl '10', deren Zahlwert '2' der 2. Primzahl '3' entspricht, und die damit in eindeutiger Weise die 2. Position im Strukturbaum festlegt, die im Fallbeispiel P. SMOLENSKY's vom Symbol 'L' eingenommen wird. Dementsprechend nehmen die Symbole 'S' und 'K' die Positionen '110' bzw. '111' ein, also, als Dualzahlen gelesen, die 6. bzw. 7. Position im Baum, denen die Primzahlen '13' und '17' entsprechen, sodaß mit der folgenden Zuweisung der Zahlen für die Symbole 'L'= 3, 'S'= 2 und 'K'= 5 im Alphabet der Ausdruck $[S_3, [S_2, S_5]] \equiv [L, [S, K]]$ die Gödel-Nummer $p_{10}^3 p_{110}^2 p_{111}^5 = 3^3 13^2 17^5$ zugewiesen bekommt.

Abb.:



1109 Nach P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. P. 282, Fn. 16 ist zu berücksichtigen, daß bei einer rekursiven (Baum-)Struktur Tensorprodukte mit verschiedenen Rängen und damit mit einer verschiedenen Anzahl von Komponenten addiert werden müssen, abhängig davon, in welcher Tiefe des Baumes sie positioniert sind,

knüpfen, sobald auch der komplexere Vektor $[r_0 \otimes S + r_1 \otimes K]$, der den rechten Teilbaum $[S, K]$ repräsentiert, einer Zerlegung (engl. "decomposition") unterworfen worden ist. Dieser (Füller-)Vektor stellt nämlich selbst eine rekursive Tensorprodukt-Repräsentation dar, die dieselbe Struktur besitzt wie der kompositionale Vektor p : eine Konstruktion in Form einer Vektoraddition aus zwei Konstituentenvektoren, hier $r_0 \otimes S$ und $r_1 \otimes K$, die jeweils die linke Konstituente 'S' und die rechte Konstituente 'K' repräsentieren, jeweils wiederum festgesetzt anhand der entsprechenden (Rollen-)Vektoren r_0 und r_1 , die eine Verzweigung nach links bzw. rechts vorschreiben. Da beide Konstituenten atomar sind, erfolgt keine weitere Zerlegung.

5.1.01.22 Das zweite ICS-Prinzip, das parallel zum ersten ICS-Prinzip $P_1.Rep_{ICS}$ läuft, behandelt die mentalen (Verarbeitungs-)Prozesse, denen die mentalen Repräsentationen unterliegen.

5.1.01.221 Das zweite ICS-Prinzip lautet nun informell wie folgt¹¹¹⁰:

$P_2.Pro_{ICS}$: Kognitive (Verarbeitungs-)Prozesse in der ICS-Architektur

Die Informationsverarbeitung erfolgt in der ICS-Architektur dadurch, daß eine Information anhand von weit verteilten (engl. "widely distributed"), gewichteten Konnektionsmustern in Form von Matrizen prozessual verarbeitet wird, die, in zentralen Aspekten der höheren Kognition, eine globale Struktur besitzen, die durch symbolische (rekursive) Funktionen der symbolischen Kognitionstheorie beschrieben werden können, m.a.W. eine Infor-

weshalb in diesem Fall die direkte Summe \oplus zu verwenden ist.

Im einzelnen siehe hierzu P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE / Y. MIYATA: Principles for an Integrated Connectionist / Symbolic Theory of Higher Cognition. Technical Report CU-CS-600-92, Department of Computer Science and 92-8, Institute of Cognitive Science. University of Colorado at Boulder. 1992. P. 19: "The crux of the idea is to add to the fundamental role vectors $\{r_0, r_1\}$ of the stratified representation a third vector v which serves basically as a place holder, like the digit 0 (...) [and] using as many v s as necessary to pad the total tensor product out to produce a tensor of some rank $D + 1$. Now, atoms at all depths are represented by tensors of the same rank (...).

Trees up to depth D can now be represented with complete accuracy (assuming the three vectors $\{r_0, r_1, v\}$ are linearly independent). The stratified representations (...) can be straightforwardly embedded as a special case of this new fully distributed representation by mapping $r_0 \rightarrow (r_0, 0)$, $r_1 \rightarrow (r_1, 0)$ and by setting $v \equiv (0, 1)$ where 0 is the zero vector with the same dimensionality as r_0 and r_1 ."

Zur sog. „direkten (Vektor-)Summe“ s. z.B. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 156, 182-87 und Br.P. McLAUGHLIN: Classical Constituents in Smolensky's ICS Architecture. In: M.L. DALLA CHIARA et al. (Eds.): Structures and Norms in Science. Volume Two of the Tenth International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Florence. August 1995. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/NL. 1997. PP. 338-41 mit einem einfachen Fallbeispiel.

1110 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 71, 192.

Vgl. hierzu auch das Prinzip Alg_{pdp} in P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. P. 224.

mationsverarbeitung erfolgt in PDP-Netzwerken durch die Ausbreitung von Aktivierungen in Form von Vektoren und Gewichtsmatrizen (engl. "weight matrices"), basierend auf dem Tensorkalkül¹¹¹¹, sodaß die konnektionistischen Verarbeitungsprozesse die zentrale Operation der Theorie der Vektorräume verwenden, u.z. die Matrixmultiplikation¹¹¹².

5.1.01.222 Dabei zeigt sich diese globale Struktur eines (Verarbeitungs-) Prozesses in einem konnektionistischen PDP-Netzwerk formal am reinsten in einem sog. „linearen Assoziator“ (engl. "linear associator")¹¹¹³. Dieser besteht aus einer Menge von m Eingabeneuronen mit den Aktivierungswerten $(i_1, i_2, \dots, i_a, \dots, i_m)$, die den Eingabevektor \mathbf{i} bilden, aus einer Menge von n Ausgabeneuronen mit den Aktivierungswerten $(o_1, o_2, \dots, o_b, \dots, o_n)$, die den Ausgabevektor \mathbf{o} bilden, und dem jeweiligen Verbindungsgewicht W_{ba} zum Ausgabeneuron b vom Eingabeneuron a . Die Summe aller Aktivierungsbeträge, die jeweils ein Ausgabeneuron o_b von einem Eingabeneuron i_a erhält, läßt sich somit anhand der Gleichung

$$o_b = \sum_a W_{ba} i_a = W_{\beta_1 i_1} + W_{\beta_2 i_2} + \dots + W_{\beta_a i_a} + \dots \quad (98)$$

wiedergeben, m.a.W. der Ausgabevektor \mathbf{o} ergibt sich aus der Multiplikation des Eingabevektors \mathbf{i} mit der Matrix der Verbindungsgewichte \mathbf{W} :
 $\mathbf{o} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{i}$, (99)

wobei „ \cdot “ die Matrixmultiplikation bezeichnet.

5.1.01.223 Die zentralen Aspekte der höheren Kognition, vor allem die Sprachverarbeitung mit ihrer rekursiven Struktur, werden demnach realisiert anhand von (Gewichts-)Matrizen mit rekursiver Struktur, das sind, zum einen, die sog. "feed-forward networks"¹¹¹⁴, die – ohne die Verwendung von geschlossenen Schleifen im Aktivierungsfluß – eine große Klasse von rekursiven Funktionen realisieren und folgende Form besitzen:

$$\mathbf{W} = \mathbf{I} \otimes \mathbf{W} . \quad (100)$$

Ein Beispiel hierfür bildet das sog. "PassiveNet"¹¹¹⁵, das Passiv- in Aktivsätze umzuformen vermag. Zum anderen sind dies die sog. "recurrent net-

1111 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213-214.

1112 Die Produktmatrix C aus der Multiplikation der Matrizen $A=(a_{ij}) \in \mathbb{R}_{n,m}$ und $B=(b_{jk}) \in \mathbb{R}_{m,r}$ ist definiert durch:

$$C = A \cdot B := \sum_{l=1}^m a_{il} \cdot b_{lk} \quad (101)$$

1113 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 192-94.

Siehe die Ausführungen in Kap. 2.25.03, Fn. 413.

1114 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 71-73, 199, 200.

Siehe auch die Ausführungen in Kap. 2.25.01.

1115 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 196-99.

works"¹¹¹⁶, die – mit der Verwendung von geschlossenen Schleifen im Aktivierungsfluß – die andere große Klasse von rekursiven Funktionen realisieren und folgende Form besitzen:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W} \otimes \mathbf{R} . \quad (102)$$

Darunter fällt auch die wichtige Unterklasse der sog. "harmonic networks"¹¹¹⁷, die symbolische Funktionen realisieren, die die Optimierung von grammatischen Strukturen betreffen.¹¹¹⁸ In beiden Fällen stellt \mathbf{W} eine finite (Gewichts-)Matrix dar, die die jeweilige rekursive kognitive Funktion berechnet, die anhand eines sequentiellen symbolischen Programms beschrieben werden kann. Die Rekursionsmatrizen \mathbf{I} und \mathbf{R} sind dabei fixe, d.h. für alle kognitiven Funktionen identische Identitätsmatrizen.¹¹¹⁹

5.1.01.23 Das dritte ICS-Prinzip behandelt die Thematik, ob die weit verteilten Aktivierungsmuster in Form von Tensorprodukt-Repräsentationen tatsächlich eine kombinatorische Syntaxstruktur besitzen, m.a.W., ob solche Repräsentationen in einem PDP-konnektionistischen System verwendet werden können, um die formalen Sprachen i.S. der sog. „CHOMSKY- Hierarchie“ (engl. "CHOMSKY hierarchy")¹¹²⁰ zu erzeugen? Das zentrale Konzept der ICS-Theorie der Sprache, das der sog. „relativen Wohlgeformtheit“ (engl. "relative well-formedness") oder der sog. „Harmonie“ (engl. "harmony"), bejaht diese Frage, und, indem der Begriff der konnektionistischen Wohlgeformtheit mit dem der linguistischen Wohlgeformtheit identifiziert werden kann, kann nicht nur ein neuer Ansatz in der Theorie der Grammatik formuliert werden, sondern damit auch – im Gegensatz zu den ersten beiden Prinzipien – ein Beitrag geleistet werden von der konnektionistischen (Berechnungs-)Theorie hin zur symbolischen Kognitionstheorie.¹¹²¹

5.1.01.231 Das dritte ICS-Prinzip lautet nun informell wie folgt¹¹²²:

1116 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 71-73, 199, 200.

Siehe auch die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1117 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 199.

1118 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.23.

1119 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 154, 156 (Box 1 (14), (15) und (18)).

1120 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 210-12 (Box 1).

1121 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 74-75, 209-10, was nach P. SMOLENSKY einer der Gründe ist, weshalb der Vorwurf des (bloßen) Implementationismus zurückzuweisen ist.

1122 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 75-76, 218.

P₃. HMax: Harmoniemaximierung (engl. "Harmony Maximization")

5.1.01.2311 Generelle Harmoniemaximierung: Die Informationsverarbeitung erfolgt in der ICS-Architektur dadurch, daß eine (Netz-)Ausgabe konstruiert wird als das Ergebnis des Aktivierungsflusses (engl. "activation flow"), für die das Paar, bestehend aus (Netz-)Ein- und Ausgabe, optimal ist: Im Rahmen der Informationsverarbeitung kann jedem Aktivierungsmuster im Netzwerk ein numerischer („Harmonie“-)Wert zugewiesen werden, der den Grad mißt, bis zu dem die sog. „Randbedingungen“ oder „Beschränkungen“ (engl. "constraints") erfüllt werden. Die Aktivierungsausbreitung (engl. "activation spread") im Netzwerk maximiert nun ein konnektionistisches Maß der Wohlgeformtheit, genannt die sog. „Harmonie“ (engl. "harmony")¹¹²³, d.h. das Ergebnis der Aktivierungsausbreitung wird sein, ein (Ausgabe-)Aktivierungsmuster mit einem maximalen Harmoniewert zu erzeugen. M.a.W., stellt sich die Konstruktion einer perzeptuellen Interpretation eines Stimulus als das Problem dar, eine Interpretation zu finden, die – bis zu einem optimalen Grad – eine Menge von numerisch gewichteten Randbedingungen, die die Harmoniefunktion definiert, zugleich am besten erfüllt (engl. "simultaneous best satisfies the constraints")¹¹²⁴.

5.1.01.2312 Harmonische Grammatik: Unter den kognitiven Anwendungsbereichen, die unter das Prinzip der Harmoniemaximierung fallen, befinden sich auch zentrale Aspekte des Sprachwissens, insbesondere die Konstruktion einer Grammatik. Dabei wird die Harmoniefunktion, hier die sog. „harmonische Grammatik“ (engl. "harmonic grammar"), als eine Funktion definiert, die eine (Netz-)Eingabe, bestehend aus einer Folge von Worten, auf eine (Netz-)Ausgabe abbildet, bestehend aus einer Strukturanalyse dieser Eingabe, den sog. „Parser“ (engl. "parse"), z.B. einen (Parser-)Strukturbaum, der i.S.v. N. CHOMSKY sog. „Phrasenstrukturgrammatik“ (engl. "phrase structure grammar")¹¹²⁵ Worte zu Phrasen gruppiert. Das Prinzip der Harmoniemaximierung behauptet nun, daß die Ausgabe, d.h. die korrekte Analyse der grammatischen Struktur, in dem (Parser-)Strukturbaum besteht, der – in einem maximalen Grad – eine Menge von Beschränkungen, die die Harmoniefunktion definiert, zugleich am besten erfüllt, weshalb diese Beschränkungen die Grammatik sind – eben eine sog. „Harmonische Grammatik“ (engl. "harmonic grammar").

5.1.01.232 Die Darlegung der formalen Struktur der Grammatiktheorie in der ICS-Architektur beginnt damit, daß P. SMOLENSKY¹¹²⁶ den Begriff der konnektionistischen Wohlgeformtheit, die Harmonie, vorab intuitiv charakterisiert: Die Harmonie eines Aktivierungsvektors in einem konnektionistischen Netzwerk ist ein numerisches Maß des Grades bis zu welchem dieser

¹¹²³ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.02.

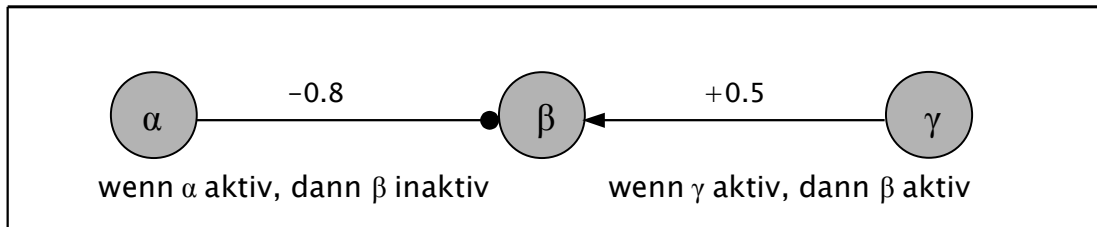
¹¹²⁴ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.22.

¹¹²⁵ Siehe einleitend z.B. Chr. DÜRSCHIED: Syntax. Grundlagen und Theorien. Westdeutscher Verl. Wiesbaden. 3. Aufl. 2005 S. 131-34 – H. PELZ: Linguistik. Eine Einführung. 7. Aufl. Hoffmann und Campe. Hamburg. 2002 S. 153-58.

¹¹²⁶ S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 212-13.

Vektor die Beschränkungen beachtet, die in der Konnektionsmatrix in Form von Vektoren kodiert sind, d.h. der Grad bis zu welchem der Vektor wohlgeformt ist in Bezug auf die Verbindungsgewichte.

Hierzu beschreibt P. SMOLENSKY¹¹²⁷ ein Beispiel (s. Graphik.34), wonach ein



Graphik.34: Schematische Darstellung eines Netzwerkbeispiels zur sog. „Harmoniemaximierung“ (engl. „Harmony Maximization“) eines Aktivierungsvektors. Zur Erläuterung siehe den Text (angelehnt an P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 213).

Netz, bestehend aus drei Knoten α , β und γ , ein negatives Verbindungsgewicht von $-0,8$ von der Einheit α zu der Einheit β besitzt, das damit als eine kleine Randbedingung aufgefaßt werden kann, daß, wenn die Einheit α aktiv ist, die Einheit β nicht aktiv sein soll, d.h., daß die Einheit β dadurch gehemmt wird, aktiv zu sein. Weiterhin besitzt die Einheit β auch ein positives Verbindungsgewicht von $+0,5$ zu einer anderen Einheit γ , das damit als eine gegensätzliche Randbedingung aufgefaßt werden kann, daß, wenn die Einheit γ aktiv ist, die Einheit β auch aktiv sein soll, d.h., daß die Einheit β dadurch angeregt wird, aktiv zu sein. Falls also beide Einheiten α und γ aktiv wären, würde sich die Einheit β zwei sich widersprechenden Randbedingungen ausgesetzt sehen, und, angenommen, die Aktivierungswerte für die beiden Einheiten α und γ wären gleich, würde die negative Aktivierung, die die Einheit β über das, dem Betrag nach höhere Verbindungsgewicht von $-0,8$ von der Einheit α erhält, die positive Aktivierung „unterdrücken“, die die Einheit β über das, dem Betrag nach niedrigere Verbindungsgewicht von $+0,5$ von der Einheit γ erhält. Zum Beispiel würde ein einzugebendes Aktivierungsmuster \mathbf{a} , bei dem beide Einheiten α und β simultan aktiv wären, z.B. mit dem Aktivierungswert der Einheit α von $\alpha_\alpha = +0.7$ und dem Aktivierungswert der Einheit β von $\alpha_\beta = +0.4$, die Randbedingung verletzen, sodaß das Aktivierungsmuster \mathbf{a} mit einer negativen Harmonie belegt wird:

¹¹²⁷ S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 213-15.

Siehe auch P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. PP. 250-52.

$$H_{\beta\alpha}(\mathbf{a}) = \alpha_{\beta} W_{\beta\alpha} \alpha_{\alpha} = (+0.4)(-0.8)(+0.7) = -0.224 \quad (103)$$

Angenommen, in demselben Aktivierungsmuster \mathbf{a} wäre der Aktivierungswert der Einheit γ ebenfalls mit +0,7 belegt, dann würde das Aktivierungsmuster \mathbf{a} die andere Randbedingung erfüllen, entsprechend der positiven Verbindungsstärke von +0,5 von der Einheit β zur Einheit γ , sodaß die Harmonie des Aktivierungsmusters \mathbf{a} in Anbetracht dieser Randbedingung positiv sein würde:

$$H_{\beta\gamma}(\mathbf{a}) = \alpha_{\beta} W_{\beta\gamma} \alpha_{\gamma} = (+0.4)(+0.5)(+0.7) = +0.140 \quad (104)$$

Die Harmonie des Gesamtnetzes unter der Berücksichtigung von beiden Randbedingungen ergibt sich dann aus der Addition der einzelnen Harmoniewerte:

$$H(\mathbf{a}) = H_{\beta\alpha}(\mathbf{a}) + H_{\beta\gamma}(\mathbf{a}) = (-0.224) + (+0.140) = -0.084 \quad (105)$$

Da das Aktivierungsmuster \mathbf{a} zwar die schwächere Randbedingung zwischen den Einheiten β und γ erfüllt, jedoch die stärkere zwischen den Einheiten β und α verletzt, führt dies insgesamt zu einer negativen Harmonie des Gesamtnetzes.

Im Gegensatz hierzu vergleicht man nun das Aktivierungsmuster \mathbf{a} mit einem Aktivierungsmuster \mathbf{a}' , das sich vom vorhergehenden nur dadurch unterscheidet, daß die Einheit β anstatt mit einem positiven mit einem negativen Aktivierungswert von $\alpha'_{\beta} = -0.4$ belegt wird. Dies führt dazu, daß nun das neue Aktivierungsmuster \mathbf{a}' zwar die schwächere Randbedingung verletzt, wonach, falls γ aktiv sei, dies auch für β gelten sollte, aber dafür nun die stärkere Randbedingung erfüllt, die besagt, daß, falls die Einheit α eine positive Aktivierung aufweist, dies für die Einheit β nicht der Fall sein sollte. Indem sich nun das Vorzeichen des Aktivierungswerts α'_{β} umkehrt, kehren sich auch alle Vorzeichen der Harmoniewerte in den obigen Gleichungen um, sodaß der Harmoniewert von $H(\mathbf{a}') = +0.084$ insgesamt positiv ist. Dies kann dahingehend interpretiert werden, daß das neue Aktivierungsmuster \mathbf{a}' in Anbetracht der vorliegenden Randbedingungen wohlgeformter ist als das andere, m.a.W., es stimmt besser mit der Menge der beiden Randbedingungen überein. Der Aktivierungsfluß im Netzwerk von den beiden Einheiten α und γ zusammengefaßt würde nun insgesamt die Einheit β hemmen und nicht erregen, sodaß der Aktivierungsfluß dahin tendiert, eher das neue Aktivierungsmuster \mathbf{a}' zu erzeugen, d.b., daß die Aktivierungsausbreitung ein Aktivierungsmuster erzeugt, das maximale Harmonie besitzt. Indem also dieses Muster dasjenige ist, das die Menge der beiden Randbedingungen zugleich am besten erfüllt, kann man deshalb allgemein sagen, daß die Aktivierungsausbreitung i.S.d. Harmoniefunktion ein Prozeß der parallelen Erfüllung von sich widersprechenden, weichen¹¹²⁸ Randbedingun-

1128 S. P. SMOLENSKY: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. Vol. 2. 1995. P. 250: Die Randbedingungen sind dabei „weich“ in dem Sinn, daß jede von anderen

gen mit unterschiedlicher Gewichtung (engl. "parallel soft-constraint satisfaction")¹¹²⁹ ist, die in der Konnektionsmatrix kodiert sind, u.z. angewendet auf die gesamte Menge von Verbindungen in einem Netzwerk. Die totale Harmonie (engl. "total Harmony") eines Musters \mathbf{a} in einem Netzwerk mit einer Verbindungsgewichtsmatrix \mathbf{W} ist demnach gerade die Summe der Harmoniewerte von \mathbf{a} unter Berücksichtigung von allen einzelnen Verbindungen in einem Netzwerk. Man erhält somit die folgende Definition der Wohlgeformtheit oder der Harmonie eines (Gesamt-)Aktivierungsvektors \mathbf{a} in einem PDP-Netzwerk (\mathbf{W}_{PDP}):

$$H(\mathbf{a}) = \sum_{\beta\alpha} H_{\beta\alpha} = \sum_{\beta\alpha} a_{\beta} W_{\beta\alpha} a_{\alpha} = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{a}, \quad (106)$$

wobei hier $\sum_{\beta\alpha}$ meint: die Summe über alle Paare von Einheiten β, α . Der letzte Term gibt diese Summe lediglich kompakter wieder, unter Verwendung der Matrixmultiplikations- und der Matrixtranspositionsoperation.¹¹³⁰

5.1.01.233 Sich gründend auf diesen Harmoniemaximierungsprozeß erhält man nun nach P. SMOLENSKY das sog. „Harmoniemaximierungstheorem“ (engl. "harmony maximization theorem")¹¹³¹, das besagt, daß in sog. „harmonischen Netzen“ (engl. "harmonical net")¹¹³² sich zu jedem Verarbeitungszeitpunkt die Harmonie des (Gesamt-)Aktivierungsvektors \mathbf{a} erhöht oder gleich bleibt. Ferner „pendelt“ sich die (Gesamt-)Aktivierung des Netzwerks – für eine sehr umfangreiche Menge von Aktivierungsregeln – zu

Randbedingungen verworfen werden und somit im Endmuster verletzt werden kann, aber auf Kosten einer geringeren Harmonie, u.z. um einen Betrag abhängig von der Stärke der verletzten Randbedingungen, d.h. die Verletzung einer Randbedingung ist nicht unmöglich wie bei „harten“ Randbedingungen.

¹¹²⁹ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.22.

¹¹³⁰ Siehe hierzu im einzelnen P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 215.

¹¹³¹ S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 218.

Eine darauf aufbauende formelle zusammenfassende Darstellung des dritten ICS-Prinzips P₃. HMax der Harmoniemaximierung findet sich in P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 219.

¹¹³² Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 217 ist ein sog. „harmonisches Netz“ (engl. "harmonical net") wie folgt definiert:

Ein PDP-Netzwerk ist harmonisch, sofern es die folgenden Eigenschaften besitzt:

(1) Aktivierungsfunktion (engl. "activation function"): Wenn die Gesamteingabe, die in irgendeine Einheit fließt, positiv ist, erhöht sich die Aktivierung, und, sofern sie negativ ist, erniedrigt sie sich.

(2) Konnektivität (engl. "connectivity"): Das Verbindungsmuster ist entweder fortlaufend (engl. "feed-forward"), d.h. ohne geschlossene Schleifen oder symmetrisch rückgekoppelt (engl. "symmetrical feedback"): $W_{\beta\alpha} = W_{\alpha\beta}$, d.h. das Verbindungsgewicht von β zu α ist gleich dem von α zu β .

(3) Aktivierungsänderung (engl. "updating"): Die Einheiten wechseln ihre Aktivierungswerte einmal zu einer bestimmten Zeit oder um einen kleinen Betrag zu jedem Zeitpunkt.

einem finalen Vektor (engl. "final vector") „ein“, der $H(\mathbf{a})$ maximiert, unter all den (Gesamt-)Aktivierungsvektoren \mathbf{a} , die als Ergänzungen (engl. "completions") eines Eingabeaktivierungsvektors \mathbf{i} zu betrachten sind. Diese Berechnung einer Ergänzung in Form eines Vektors \mathbf{a} schließt auch eine Abbildung des Eingabevektors \mathbf{i} auf den Ausgabevektor \mathbf{o} mit ein, die die (Harmonie-)Funktion f darstellt, die durch das Netzwerk berechnet wird.

5.1.01.234 Die Überlegung der formalen Struktur einer Grammatiktheorie in der ICS-Architektur wieder aufgreifend, ergeben sich nun für P. SMOLENSKY folgende Konsequenzen aus den beiden konnektionistischen Prinzipien der Harmoniemaximierung und der Tensorprodukt-Repräsentation in Bezug auf die „Harmonie“ von Symbolstrukturen im Sinne einer sog. „Harmonischen Grammatik“, zusammengefaßt im sog. „Theorem der weichen Randbedingungen in der Harmonischen Grammatik“ (engl. "Harmonic Grammar Soft Constraint Theorem" ($W_{f_{ICS}}(HC)$))¹¹³³: Man betrachtet dabei einen Tensorprodukt-Vektor \mathbf{a} gemäß dem ersten ICS-Prinzip Rep_{ICS} , der eine symbolische Struktur s mit den Konstituenten c_j und c_k realisiert.

(1) Die Harmonie dieser Repräsentation berechnet sich dann gemäß der Formel

$$H(s) \equiv H(\mathbf{a}) = \sum_{j \leq k} H(c_j, c_k), \quad (107)$$

wobei $H(c_j, c_k)$, die Harmonie, die sich aus dem gleichzeitigen Vorkommen der Konstituenten c_j und c_k ergibt, jeweils für alle Symbolstrukturen s konstant ist.

(2) Entsprechend kann die Harmonie von s berechnet werden, indem die folgenden Regeln verwendet werden:

R_{jk} : Falls s gleichzeitig die Konstituenten c_j und c_k enthält, dann hat man den numerischen Wert $H(c_j, c_k)$, zu H zu addieren.

Jede Regel R_{jk} wird nun als eine weiche Regel (engl. "soft rule") bezeichnet, und die Menge von weichen Regeln definiert eine Harmonische Grammatik (engl. "Harmonic Grammar"). Um also die Harmonie einer Struktur s zu bestimmen, hat man zuerst alle Regeln R_{jk} , die auf s angewendet werden können, aufzufinden, und addiert dann die jeweiligen entsprechenden Harmoniebeiträge $H(c_j, c_k)$, auf.

(3) Die weichen Regeln können ferner entsprechend in sog. „weiche Randbedingungen“ (engl. "soft constraints") umgeformt werden: Falls nämlich die Harmonie $H(c_j, c_k)$ einen positiven (negativen) Wert $+w_{jk}$ ($-w_{jk}$) annimmt, dann wird die Regel R_{jk} als die folgende positive (negative) Randbedingung interpretiert, wobei w_{jk} ein Verbindungsgewicht bezeichnet:

C_{jk} : Die Symbolstruktur s sollte (nicht) gleichzeitig die Konstituenten c_j und c_k enthalten.

¹¹³³ S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 219-20.

Dann wird die Harmonie der Symbolstruktur $H(s)$ dadurch berechnet, indem die Verbindungsgewichte aller positiven Randbedingungen addiert werden, die s erfüllen (engl. "satisfy"), und indem die Gewichte aller negativen Randbedingungen, die s verletzen, subtrahiert werden.

(4) Die niedrigere Stufe eines konnektionistischen Netzwerks betrachtend ist nun jeder Harmoniebeitrag $H(c_j, c_k)$ ein Maß des Grades bis zu dem sich das Paar von Vektoren \mathbf{c}_j und \mathbf{c}_k , die die Konstituenten c_j und c_k realisieren, an die weichen Randbedingungen angepaßt (engl. "conform") hat, die in der Gewichtsmatrix \mathbf{W} kodiert sind und kann anhand der folgenden Formel berechnet werden

$$H(c_j, c_k) = H(\mathbf{c}_j, \mathbf{c}_k) = \sum_{\beta\alpha} [c_j]_{\beta} (W_{\beta\alpha} + W_{\alpha\beta}) [c_k]_{\alpha}, \quad (108)$$

wobei $[c_k]_{\alpha}$ der Aktivierungswert der Einheit α im Vektor \mathbf{c}_k ist, der die Konstituente c_k realisiert.

(5) Der Harmoniebeitrag $H(c_j, c_k)$ kann nun als die sog. „interagierende Harmonie“ (engl. "interaction Harmony") des Paares (c_j, c_k) interpretiert werden, d.h. der Betrag der Harmonie, der von den Konstituenten c_j und c_k beigesteuert wird, wenn sie beide zusammen auftreten, und der über die Summe der Harmoniebeiträge der beiden Konstituenten c_j und c_k hinausgeht, wenn sie alleine vorkommen.

Dies entspricht somit einem einfachen Fall von Kompositionalität, u.z. besteht die Harmonie einer Struktur als ganzer aus der Summe der Harmoniebeiträge, die von all ihren Konstituenten beigesteuert werden.

Zur Erläuterung des Theorems führt nun P. SMOLENSKY¹¹³⁴ solche weichen Randbedingungen an, die den konventionellen Regeln einer Phrasenstrukturgrammatik i.S.v. N. CHOMSKY¹¹³⁵ entsprechen, indem ein Satz (S) aus einer Nominalphrase (NP) (engl. "Noun Phrase") und einer Verbalphrase (VP) (engl. "Verb Phrase") besteht:

$$S \rightarrow NP VP$$

Zwei entsprechende weiche Randbedingungen, die Instanzen des allgemeinen Schemas der weichen Regel R_{jk} darstellen, lauten demnach informell:

- (1) $R_{S,NP}$: Falls die Symbolstruktur s eine Konstituente, bezeichnet mit S , enthält und ihre linke Sub-Konstituente mit NP bezeichnet wird, dann wird +2 zu H addiert.
- (2) $R_{S,VP}$: Falls die Symbolstruktur s eine Konstituente, bezeichnet mit S , enthält und ihre rechte Sub-Konstituente mit VP bezeichnet wird, dann wird +2 zu H addiert.

1134 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 220-21.

1135 Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 226-27 kann damit jede kontextfreie Sprache anhand einer Harmonischen Grammatik spezifiziert werden.

Indem nun das Harmoniemaximierungstheorem angewendet wird, läßt sich nun nach P. SMOLENSKY¹¹³⁶ die Funktionsweise der Harmonischen Grammatik – im Prinzip – wie folgt verdeutlichen: Ein PDP-Netzwerk erhält die Eingabe irgendeiner symbolischen Struktur s , kodiert als ein Eingabeaktivierungsvektor \mathbf{i} , dessen syntaktische Struktur es in Bezug auf seine harmonische Grammatik, die in der Konnektionsmatrix W kodiert ist, zu analysieren hat. M.a.W. besteht die Netzleistung darin, daß dieser Eingabeaktivierungsvektor \mathbf{i} zu ergänzen ist hin zu einem (Gesamt-)Aktivierungsvektor \mathbf{a} , der eine maximale Harmonie aufweist, um – als Teil dieses maximal harmonischen Vektors \mathbf{a} – einen Ausgabeaktivierungsvektor \mathbf{o} zu erzeugen, der eine maximal harmonische Symbolstruktur erzeugt. Je höher nun der Wert der Harmonie dieser Symbolstruktur ist, d.h. je mehr der erzeugte korrekte (Parser-)Strukturbaum zugleich eine Menge an Randbedingungen maximal erfüllt, m.a.W. die in Konflikt stehenden Anforderungen der Randbedingungen optimal „ausbalanciert“, desto mehr wird die Harmonische Grammatik in Form dieser Randbedingungen die Eingabe als wohlgeformt beurteilen.

5.1.01.24 Das vierte ICS-Prinzip betrifft zwar – ebenso wie die Harmonische Grammatik – eine optimierungsbasierte Grammatiktheorie, die sog. „Optimalitätstheorie“ (engl. “Optimality Theory (OT)”), die sich aber mit einer nichtnumerischen Optimierung beschäftigt, dafür aber eine umfassende Sprachtheorie darstellt, die z.B. die Phonologie, die Semantik und die Pragmatik miteinbezieht, jedoch noch nicht vollständig in die Berechnungsweise des Konnektionismus eingebunden ist, weshalb hier nur kurz darauf eingegangen wird¹¹³⁷:

P₄. OT: Optimalitätstheorie

Eine Grammatik besteht in ihrem Kern aus einer Menge von universellen, weichen (engl. “soft”) bzw. verletzbaren (engl. “violable”) Randbedingungen (engl. “constraints”), die parallel angewendet werden, um die optimale Wohlgeformtheit einer linguistischen Struktur zu erzeugen, wobei – im Gegensatz zur Harmonischen Grammatik – die Konflikte zwischen den Randbedingungen über eine sprachspezifische, sog. „strikte Dominanzhierarchie“ (engl. “strict domination hierarchy”) gelöst werden, d.h. jede Rand-

¹¹³⁶ Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 221-22.

Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 222-24 kann nun gezeigt werden, daß das Theorem $W_{fics}(HC)$ aus den beiden ICS-Prinzipien P₁. Repics und P₃. HMax abgeleitet werden kann, indem man dem Vektor \mathbf{a} in der Formel der Harmoniefunktion W_{PDP} gemäß Repics folgende Form zuweist:

$$\mathbf{a} = \sum_i \mathbf{c}_i = \sum_i \mathbf{f}_i \otimes \mathbf{r}_i, \quad (109)$$

wobei die Vektoren $\{\mathbf{c}_i\}$ in Form der Füller/Rolle-Bindung die Konstituenten $\{c_i\}$ realisieren, die Elemente einer Symbolstruktur s sind, die von einem (Gesamt-)Aktivierungsvektor \mathbf{a} realisiert wird.

¹¹³⁷ Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 38-45, v.a. PP. 39, 136.

bedingung, die im Rang über den anderen steht, besitzt absolute Priorität gegenüber den anderen, die einen geringeren Rang in der Hierarchie einnehmen, m.a.W. nicht mehr die numerisch gewichtete Verbindungsstärke, sondern nur der Rang einer Randbedingung in der Hierarchie entscheidet über das Kriterium der Optimalität.¹¹³⁸

5.1.01.3 IMPLIKATIONEN DER ICS-(ARCHITEKTUR-)THEORIE P. SMOLENSKY'S

5.1.01.30 Nach P. SMOLENSKY¹¹³⁹ liefert die ICS-Theorie nun eine umfassende Theorie der kognitiven Architektur, die das mit der (Heraus-)Forderung J.A. FODOR's und Z.W. PLYSHYN's¹¹⁴⁰ verbundene Dilemma löst, indem die extremen Positionen des Eliminativismus¹¹⁴¹, wonach Symbole wegen ihrer mangelnden neurobiologischen Plausibilität nicht in einer Kognitionstheorie verwendet werden dürften, und des Implementationismus¹¹⁴², wonach künstliche neuronale Netzwerke Symbolstrukturen „bloß implementieren“, abzulehnen sind.¹¹⁴³ Vielmehr vereinigt die ICS-Theorie die Vorzüge sowohl der symbolischen wie auch der konnektionistischen Berechnungsweise¹¹⁴⁴, indem, zum einen, die Leistung ersterer erhalten bleibt mentale Erklärungen bereitzustellen, und, zum anderen, der Vorteil letzterer bewahrt wird Kognition auf neurobiologisch plausible Elementarberechnungen zurückzuführen.

1138 Nach P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 78, 125-40 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 484.

1139 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 101.

1140 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.1.

1141 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989 und W. RAMSEY / ST. STICH / J. GARON: *Connectionism, Eliminativism and the Future of Folk Psychology*. Philosophical Perspectives. Vol. 4. 1990. PP. 499-533.

1142 S. Br.P. McLAUGHLIN: *Classical Constituents in Smolensky's ICS Architecture*. In: M.L. DALLA CHIARA et al. (Eds.): *Structures and Norms in Science*. Volume Two of the Tenth International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Florence. August 1995. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/NL. 1997. PP. 331-43.

1143 Nach P. SMOLENSKY: *Putting together Connectionism – again*. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. P. 61 steht die Subsymbolische Theorie der Kognition zur Klassischen Symboltheorie i.S.v. J.A. FODOR, Z.W. PLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN im Verhältnis von Mikro- zu Makrotheorie, z.B. in Analogie zur Beziehung der klassischen und der statistischen Thermodynamik in der physikalischen Chemie. Dabei geht P. SMOLENSKY von einer sog. „limitivistischen Position“ (engl. "limitivist position") aus mit dem sog. „Prinzip der approximativen Erklärung“ (engl. "Principle of Approximate Explanation"), d.h., daß eine Makrotheorie eine Mikrotheorie nur „approximiert“ (engl. "approximate") in dem Sinn, daß die Gesetze einer Makrotheorie nur bis zu einem gewissen Grad der Approximation gelten, wobei die Mikrotheorie die Anwendbarkeit der Makrotheorie begrenzt (engl. "limits"), und ihre Beziehung zur Makrotheorie eine „Verfeinerung“ (engl. "refinement") darstellt.

1144 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.20.

5.1.01.31 Dazu hat man nach P. SMOLENSKY¹¹⁴⁵ – in Anlehnung an den U.S.-amerikanischen (Neuro-)Informatiker und Mathematiker David MARR¹¹⁴⁶ – eine Kognitionstheorie auf drei Ebenen zu analysieren, u.z. auf der funktionalen Ebene (engl. "functional level")¹¹⁴⁷, auf der eine Beschreibung der kombinatorischen Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen sowie der mentalen struktursensitiven Prozesse vorgenommen wird, auf der physikalischen Ebene, auf der eine Beschreibung der neurobiologischen Struktur vorgenommen wird, und auf der dazwischen liegenden komputationalen Ebene (engl. "computational level")¹¹⁴⁸, deren Analyse seitens der ICS-Theorie von der der sog. "Purely Symbolic Architecture (PSA)" – im weiteren „PSA-Theorie“ genannt – entscheidend differiert, im Gegensatz zu den beiden anderen Analyseebenen. Während nämlich die PSA-Theorie mit ihrer Berechnungsweise anhand von Symbolen den Anforderungen des neuronalen Berechnungsmodus von neurobiologischen Systemen nicht gerecht wird, gelingt dies nach P. SMOLENSKY der ICS-Theorie, indem eine Brücke geschlagen wird zwischen den abstrakten kognitiven Funktionen des Symbolismus und den neuronal plausibleren, elementaren konnektionistischen Prozeßoperationen. Dazu hat man die komputationale Ebene der ICS-Theorie in zwei Subebenen zu zerlegen: Auf der höheren Subebene stellen Repräsentationen Aktivierungsvektoren dar, die anhand der Tensorprodukt-Repräsentation auf eine Weise in Konstituentenvektoren zerlegt werden können, die der Zerlegung entspricht – im Sinne eines Isomorphismus, die auf der funktionalen Ebene stattfindet, indem komplexe Symbolstrukturen in ihre Konstituenten zerlegt werden. Z.B. drückt der Vektor $\mathbf{s} = \mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{A} + \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{B}$ eine Zerlegung des Vektors \mathbf{s} in seine Konstituentenvektoren $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{A}$ und $\mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{B}$ aus, die isomorph ist zur Zerlegung der Symbolstruktur $s = [A, B]$ in ihre Konstituenten A und B. Zugleich ist die Zerlegung auf der niedrigeren Subebene davon völlig verschieden, da eine Repräsentation, ein Aktivierungsmuster, in die einzelnen Aktivierungswerte der Netzwerkeinheiten zerlegt wird, anhand derer das Muster realisiert wird. Z.B. kann der Aktivierungsvektor \mathbf{s} in eine Liste von Zahlwerten (s_1, s_2, \dots) zerlegt werden, wobei jeder davon einem Aktivierungswert eines einzelnen konnektionistischen Neurons entspricht. Während nun nach der Meinung P. SMOLENSKY's diese Zerlegung wiederum isomorph ist zur Zerlegung eines

1145 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 101-103 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 514-16, im einzelnen PP. 516-69.

1146 S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.13 Fn. 22.

1147 Bei D. MARR wird dies allerdings als sog. „komputationale Ebene“ (engl. "computational level") bezeichnet!

S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.13.

1148 Bei D. MARR wird dies allerdings als sog. „algorithmische Ebene“ (engl. "algorithmic level") bezeichnet!

S. hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 1.13.

neurobiologischen Aktivitätsmusters in eine Liste von numerischen Aktivierungswerten von individuellen Neuronen, gibt es – nach der Meinung P. SMOLENSKY's – zwischen den beiden Subebenen der komputationalen Ebene gerade keine isomorphe Relation, u.z. aufgrund des völlig verteilten Repräsentationsformats¹¹⁴⁹ in einer konnektionistischen Architektur. Z.B. ein auf der höheren Subebene einzuordnender Konstituentenvektor $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{A}$ korrespondiert daher zu einer Vielzahl von Aktivierungswerten der einzelnen Neuronen, die das Aktivierungsmuster $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{A}$ bilden, und umgekehrt, eine zu der niedrigeren Subebene gehörende Aktivierung eines einzelnen Neurons k korrespondiert zu einer Vielzahl von Aktivierungsmustern, an deren Erzeugung es beteiligt ist, d.h. zu einer Vielzahl von Konstituentenvektoren, z.B. $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{A}$ und $\mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{B}$. Dieses Ergebnis der Analyse auf der komputationalen Ebene umschreibt P. SMOLENSKY, indem er sagt, daß „die Zerlegungen auf der höheren und der niedrigeren Ebene einander überkreuzen“ (engl. “crosscut one another”).

5.1.01.32 Daher stellt die ICS-Theorie nach P. SMOLENSKY¹¹⁵⁰ eine Architektur mit einer aufgespaltenen Ebene dar (engl. “split-level architecture”), wobei nur die höhere komputationale Subebene eine funktionell-relevante Struktur und nur die niedrigere komputationale Subebene eine prozessuell-relevante Struktur¹¹⁵¹ bereitstellt¹¹⁵²: Die sowohl in der PSA-Theorie wie auch in der ICS-Theorie auf der höheren Subebene stattfindende Zerlegung von Repräsentationen in ihre Konstituenten ist damit entscheidend, um die funktionelle Bedeutung der Repräsentationen zu bestimmen, einschließlich ihrer kompositionalen Semantik, während die auf der niedrigeren Subebene stattfindende Zerlegung in individuelle Neuronenaktivitäten entscheidend ist, um die (kognitiven) Prozesse bzw. die Prozeßalgorithmen zu bestimmen, die die Repräsentationen tatsächlich erzeugen, eben die konnektionistischen Algorithmen, d.h. diese interne Kausalstruktur in Form der vektorialen Aktivierungsausbreitung in einem konnektionistischen Netzwerk, die die Informationsverarbeitung in einem neurobiologischen System plausibler modelliert als die symbolischen Algorithmen, besitzt eben keine Entsprechung auf der höheren symbolischen Ebene.

5.1.01.33 Damit kann man m.E. mit P. SMOLENSKY¹¹⁵³ abschließend feststel-

1149 Siehe die Ausführungen in Kap. 2.222.4.

1150 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 103-106 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: *Linguistic and Philosophical Implications*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 515-16, im einzelnen PP. 516-69.

1151 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 103 verwendet m.E. zu Unrecht die Bezeichnung “physically relevant structure”, da er selbst zuvor (PP. 33-34) die Bezeichnung “process-relevant decomposition” für diesen Sachverhalt gebraucht.

1152 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.20.

1153 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/

len, daß die auf Subsymbolen in Form von Vektoren operierende ICS-Theorie eine alternative (Mikro-)Theorie der Kognition darstellt, deren konstitutiven Elemente zwar nicht aus klassischen Konstituenten mit einer klassischen Konstituentenstruktur und klassisch inferentiellen Prozessen bestehen, diese jedoch auf der höheren komputationalen Subebene im Rahmen einer homomorphen Transformation in konnektionistische Repräsentationsformen umgewandelt werden können, sodaß damit „Symbole komputational relevant sind.“¹¹⁵⁴ Es handelt sich jedoch m.E. nur insoweit uneingeschränkt um einen sog. „Implementationskonnektionismus“ i.S.v. Br.P. McLAUGHLIN¹¹⁵⁵, wenn man voraussetzt, daß eine ultralokale Repräsentationsform¹¹⁵⁶ benutzt wird, da man in diesem Fall eine klassische Konstituentenstrukturarchitektur i.S.v. J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN konstruiert hätte, wohingegen man aber im Fall einer, von P. SMOLENSKY in der Regel benutzten, völlig verteilten Repräsentationsform eine subsymbolische Systematizität, Kompositionalität und Produktivität eigenen Typs besitzen würde¹¹⁵⁷, da, zum einen, in diesem Fall nicht die auf dem Konkatenationsprinzip beruhende symbolische Konstituentenstruktur, sondern die auf dem Superpositionsprinzip beruhende völlig verteilten Repräsentationsform des Konnektionismus prozeß-relevant ist¹¹⁵⁸, und, zum anderen, auf der niedrigeren komputationalen Subebene eben konnektionistische und nicht symbolische Algorith-

MA, London. 2006. PP. 103-104 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 515-16, im einzelnen PP. 513, 518-19, 569-89, v.a. PP. 574-765.

1154 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. P. 519.

1155 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.30.

1156 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.1.

1157 Zustimmend in Bezug auf eine subsymbolische Konstituentenstruktur eigenen Typs: T. HORGAN / J. TIENSON: *Structured Representations in Connectionist Systems?* In: St. DAVIS (Ed.): *Connectionism: Theory and Practice*. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 213-18 und T. HORGAN / J. TIENSON: *Connectionism and the Philosophy of Psychology*. MIT Press. 1996. PP. 74-81, 156-60.

M.E. wäre weiterhin zu bedenken, daß vielleicht das fundamentale Charakteristikum von künstlichen Neuronalen Netzwerken eben darin besteht, „abgeleitet“ aus den zu lernenden Symbolstrukturen der menschlichen Sprache die relevanten statistischen Strukturrelationen zu „extrahieren“, und gerade darin ihre Kompetenz in Bezug auf eine subsymbolische Systematizität zu sehen ist.

1158 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 575-76 umschreibt dies mit „Impairment to parts versus wholes“, da die Beschädigung von prozessrelevanten Konstituenten in der PSA-Theorie zu einer Unterbrechung des (Gesamt-)Verarbeitungsvorganges im Rahmen einer kognitiven Funktion führt – im Gegensatz zur ICS-Theorie, wo das Superpositionsprinzip zur Folge haben kann, daß ein Fehler in einem Teilverarbeitungsschritt im Fortgang der Gesamtverarbeitung wieder aufgehoben wird (engl. „resistance to noise“).

Siehe hierzu auch J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: *The Appeal of Parallel Distributed Processing*. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 20-29.

men prozeßrelevant sind. Die Reduktion von der höheren zur niedrigeren komputationalen Subebene wird nach P. SMOLENSKY¹¹⁵⁹ von einer formalen Realisierungsabbildung (engl. "formal realization mapping") geleistet, die zwar „eine Reduktion einer Symbolstruktur auf konnektionistische Neuronen erlaubt“, aber auf Grund der verteilten Repräsentationsform des Konnektionismus keine isomorphe, sondern eine homomorphe Reduktion darstellt, m.a.W., der Mangel einer strukturidentischen Korrespondenz der Komponenten zueinander führt dazu, daß die symbolische Analyse eben nicht isomorph, sondern nur homomorph auf die prozeßrelevante vektorielle Analyse abgebildet werden kann.

5.1.01.4 KRITIK, EVALUATION UND FAZIT DER ICS COGNITIVE ARCHITECTURE

Demnach besitzt die ICS-Architektur m.E. – in Analogie zu einem optischen Hologramm¹¹⁶⁰ – eine sog. „holistische“ oder „holographische Informations(-prozeß-)struktur“, die eine mathematisch exakte numerische Distanzmetrik erzeugt, z.B. basierend auf der sog. „Euklidischen Distanz“ (engl. "Euclidean distance")¹¹⁶¹, weshalb sie auf der Basis von präzisen Differentialgleichungen der Dynamischen Systemtheorie, orientiert am Harmoniemaximierungstheorem einen eigenständigen Typ einer subsymbolischen Systematizität, Produktivität und starken Kompositionalität, wenigstens, auszuführen in der Lage ist, und, dem erweiterten Begriff einer kognitiven Erklärung i.S.v. R.J. MATTHEWS¹¹⁶² folgend, die Haupteigenschaften der Kognition i.S.v. J.A. FODOR, Z.W. PLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN¹¹⁶³ auch erklärt. Entscheidend für den sog. „holographischen Charakter“ der ICS-Architektur ist jedoch die Verwendung von völlig verteilten Repräsentationen mit ihrer Überlagerung von vektoriellen Informationselementen sowie die Verwendung von Prozessen i.S.v. weichen Regeln des "Parallel Soft Constraint Satisfaction Modeling"¹¹⁶⁴, wobei zusätzlich zu beachten ist, daß die Differentiation der Klassischen Symboltheorie in diskrete Symbolrepräsentationen und symbolstruktursensitive Prozesse in der konnektionistischen Theorie nicht mehr aufrechterhalten werden kann, da diese sog. „fluide Architektur“ (engl. "fluid architecture")¹¹⁶⁵ gerade dadurch charakterisiert

1159 S. Fn. 92.

1160 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4, v.a. Fn. 365.

1161 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4, v.a. Fn. 76. und Kap. 4.21.0.

1162 R.J. MATTHEWS: Connectionism and Systematicity. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 689. Siehe eingehend hierzu R.J. MATTHEWS: Can Connectionists Explain Systematicity? Mind and Language. Vol. 12. 2001. PP. 154-77, v.a. PP. 169-70, 175 und R.J. MATTHEWS: Three-Concept Monte: Explanation, Implementation and Systematicity. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 347-63, v.a. PP. 358-59, 360, 361.

1163 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.12.

1164 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.22, 5.1.01.2311, 5.1.01.234.

1165 In Anlehnung an R.L. CHRISLEY: Fluid Architecture: Connectionist Systematicity. 2000. From: <http://www.cogs.susx.ac.uk/users/ronc/fluid.ps>.

S. auch J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explo-

ist, daß eine beständig fließende Transformation von Vektor- und Tensor-matrizen erfolgt, die im Prinzip die Differentiation zwischen der Informationsrepräsentation und des Informationsprozesses aufhebt, m.a.W. das Subsymbol i.S.d. Neuronenaktivität ist zugleich (Mikro-)Prozessor und repräsentationales (Mikro-)Engramm.

5.1.02 HOLOGRAPHIC REDUCED REPRESENTATIONS NACH T.A. PLATE

5.1.02.1 Anknüpfend an die sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. “tensor product representation”) P. SMOLENSKY's¹¹⁶⁶ und die sog. “reduced descriptions” G.E. HINTON's¹¹⁶⁷, entwickelt der kanadische Informatiker Toni A. PLATE¹¹⁶⁸ eine verteilte (engl. “distributed”) und ähnlichkeiterhaltende (engl. “similarity preservation”) Repräsentationsform für rekursive, kompositionale (Symbol-)Strukturen, basierend auf der bilinearen¹¹⁶⁹, assoziativen Operation der sog. „Zirkularkonvolution“ (engl. “circular convolution”) ¹¹⁷⁰, u.z. die

1166 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.213.

1167 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.26.

S. z.B. einfürend T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1006 – T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 13-16.

1168 Zur Person Toni A. PLATE's siehe die Website <http://internet.cybermesa.com/~champagne/~tplate/>.

1169 Zum Begriff der sog. „Bilinearität“ (engl. “bilinearity”) s. z.B. T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. CSLI Publications. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 94, Fn. 26, 226.

1170 Zur sog. „Zirkularkonvolution“ s. z.B. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 55-57, 63-65 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. PP. 625-26 – T.A. PLATE: Structure Matching and Transformation with Distributed Representations. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. P. 310 – T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/ CA. 2003. PP. 94-96.

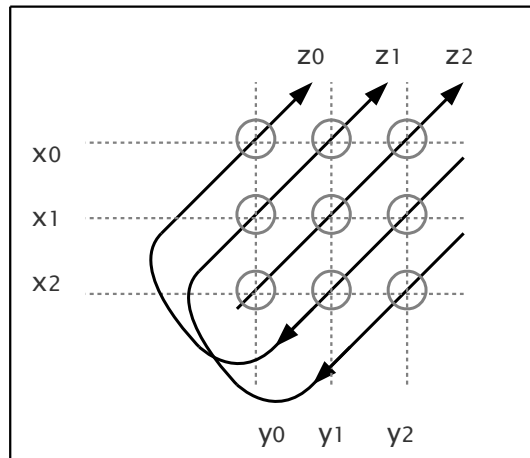
Zu den mathematischen Eigenschaften s. z.B. T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. PP. 632-34.

Einführend zur mathematischen Operation der Zirkularkonvolution s. z.B. T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. PP. 824-25 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1007 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 258-60 – VI. KVASNIČKA / J. POSPÍČHAL: Holographic Reduced Representation in Artificial Intelligence and Cognitive Science. Manuscript. 2004. PP. 1-32, v.a. PP. 3-4 – St. HÖLDOBLER: Computational Logic. Working Material. Artificial Intelligence Institute. Technische Universität Dresden. 2004. PP. 257-58 – T. SEILER: Rekursiver Autoassoziativer Speicher und Holographisch Reduzierte Repräsentation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1996. S. 35-37.

S. auch E.Th. JAYNES: Probability Theory: The Logic of Science. 7th Ed. Cambridge University Press. Cambridge. 2010. PP. 677-81.

Da die Operation der Zirkularkonvolution in der physikalischen Lasertechnik und der optischen Holographie verwendet wird, spricht man deshalb auch von sog. „holographischen' Modellen“ (engl. “holographic models”).

S. z.B. D. WILLSHAW: Holography, Associative Memory, and Inductive Generalization. In: G.E. HINTON / J.A. ANDERSON (Eds.): Parallel Models of Associative Memory. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1981. PP. 83-104.



Graphik.35: Schematisches Diagramm einer Zirkularkonvolution als komprimiertes Vektorprodukt, das anhand eines Beispiels (Formeln.111-114) in Fn. 1175 erläutert wird. Die Kreise repräsentieren dabei die Komponenten des Vektorprodukts der Vektoren x und y . Die Komponenten der Konvolution bestehen dann jeweils aus der Summe der Komponenten des Vektorprodukts entlang der gefalteten Diagonalen (T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. P. 825. S. auch T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. P. 56 und T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. CSLI Publications. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. P. 95).¹¹⁷¹

sog. "Holographic Reduced Representations (HRRs)"¹¹⁷² (dt. „Holographisch

1171 S. hierzu Fn. 1175.

1172 Erstmals publiziert in T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Technical Report CRG-TR-91-1. Department of Computer Science. University of Toronto. 1991 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations: Convolution Algebra for Compositional Distributed Representations. In: J. MYLOPOULOS / R. REITER (Eds.): Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1991. PP. 30-35, v.a. P. 30. Eingehend hierzu s. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 63-100 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. PP. 623-41 – T.A. PLATE: Structure Matching and Transformation with Distributed Representations. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 309-27 – T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 93-144.

Einführend hierzu s. z.B. T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. PP. 824-25 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1007 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 256-63 – Chr. ELIASMITH: Structure without Symbols: Providing a Distributed Account of Low-Level and High-Level Cognition. The 89th Annual Meeting of the Southern Society for Philosophy and Psychology. Atlanta/GA. Conference March, 1997 PP. 3-6. From: <http://www.arts.uwaterloo.ca/~celiasmi/Papers/SSPP.html> – VI. KVASNIČKA / J. POSPÍČHAL: Ho-

Reduzierte Repräsentationen“, im weiteren als „HRRs-Architektur“ bezeichnet), die sich dadurch auszeichnet, daß, im Gegensatz zur Tensorprodukt-Repräsentation P. SMOLENKY's¹¹⁷³, der resultierende Vektor der Zirkularkonvolution von zwei Vektoren der Länge bzw. Dimensionalität n , m.a.W. des Ranges (engl. "rank"), wiederum die Länge bzw. Dimensionalität n besitzt, sodaß die Länge bzw. Dimensionalität n der (Vektor-)Repräsentation auch bei der Anwendung auf rekursive Strukturen konstant bleibt (s. Graphik.35).¹¹⁷⁴

Die Zirkularkonvolution eines n -dimensionalen Vektors $z = x \otimes y$, die auch als sog. „Faltung“ bezeichnet wird, kann als eine Kompression (engl. "compression") bzw. Kontraktion (engl. "contraction") des Tensor- oder des äußeren Produkts von zwei n -dimensionalen Vektoren x und y aufgefaßt werden, und wird dabei wie folgt definiert¹¹⁷⁵:

$$z_i = \sum_{k=0}^{n-1} x_k y_{(i-k) \bmod n}. \quad (110)$$

5.1.02.2 Im Rahmen der HRRs-Architektur T. PLATE's wird nun die Operation der Zirkularkonvolution, ebenfalls wie die Tensorproduktoperation im Rah-

lographic Reduced Representation in Artificial Intelligence and Cognitive Science. Manuscript. 2004. PP. 1-32, v.a. PP. 3-8 – St. HÖLDOBLER: Computational Logic. Working Material. Artificial Intelligence Institute. Technische Universität Dresden. 2004. PP. 256-59 – T. SEILER: Rekursiver Autoassoziativer Speicher und Holographisch Reduzierte Repräsentation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1996. S. 34-37.

S. auch T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 608-610 mit einem Rechenbeispiel.

Kritisch dazu s. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 98-99.

1173 S. hierzu z.B. T.A. PLATE: Structure Matching and Transformation with Distributed Representations. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 323-24.

1174 S. z.B. T. SEILER: Rekursiver Autoassoziativer Speicher und Holographisch Reduzierte Repräsentation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1996. S. 35, 37.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 3.25.

1175 S. T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 94-96, v.a. P. 95 – T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. P. 824.

S. auch St. HÖLDOBLER: Computational Logic. Working Material. Artificial Intelligence Institute. Technische Universität Dresden. 2004. P. 257, der folgendes einfaches Beispiel anführt:

Gegeben sind die beiden Vektoren $x = (x_0, x_1, x_2)$ und $y = (y_0, y_1, y_2)$, dann erhält man die Zirkularkonvolution des Vektors

$$z = x \otimes y \quad (111) \text{ mit}$$

$$z_0 = x_0 y_0 + x_1 y_2 + x_2 y_1, \quad (112)$$

$$z_1 = x_0 y_1 + x_1 y_0 + x_2 y_2, \quad (113)$$

$$z_2 = x_0 y_2 + x_1 y_1 + x_2 y_0. \quad (114)$$

S. hierzu die Graphik.35 mit einer graphischen Interpretation.

men der ICS-Architektur P. SMOLENKY's¹¹⁷⁶ dazu verwendet, Füller/Rolle-Bindungen i.S.d. sog. „Variablenbindung“ (engl. „variable binding“)¹¹⁷⁷ herzustellen, wobei, im Gegensatz zur Tensorprodukt-Repräsentation P. SMOLENKY's, auf Grund der Existenz eines (approximativen) Inversen bei der Zirkular-konvolutionsoperation, jeder beliebige Füllervektor rückrechenbar ist.¹¹⁷⁸

5.1.02.3 Das Modell der Holographic Reduced Representations ist nun z.B. mit dem des Simple Recurrent Network nach J.L. ELMAN¹¹⁷⁹ kombiniert worden zu dem der sog. „Holographic Recurrent Networks (HRNs)“¹¹⁸⁰, um anhand der Methode der Zirkular-konvolution Sequenzen von Symbolen ent-

1176 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.213.

1177 S. z.B. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 72-75 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations: Convolution Algebra for Compositional Distributed Representations. In: J. MYLOPOULOS / R. REITER (Eds.): Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1991. P. 33 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. P. 629.

Ein Beispiel wird angeführt in T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 105-106 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. PP. 635-38 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1007.

1178 Das (approximative) Inverse x^T des n -dimensionalen Vektors x wird dabei wie folgt definiert:

$$x_i^T = x_{(-i) \bmod n}. \quad (115)$$

Eingehend hierzu s. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 81-83 – T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 96-98, 118-19.

Einführend hierzu s. z.B. T.A. PLATE: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. P. 825 – T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2002. P. 1007 – M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 637 – T. SEILER: Rekursiver Autoassoziativer Speicher und Holographisch Reduzierte Repräsentation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1996. S. 35.

Ein Rechenbeispiel kann man finden z.B. bei T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 89-97 – T.A. PLATE: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003. PP. 128-38 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 608-10, v.a. P. 609.

1179 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.25.02.

1180 S. z.B. T.A. PLATE: Holographic Recurrent Networks. Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 5. 1993. PP. 34-41 – T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 110-13.

lang einer vorbestimmten Trajektorie im kontinuierlichen (Vektor-)Raum zu erzeugen (engl. "trajectory-associated sequences").

5.1.02.4 Zusammenfassend kann man abschließend sagen¹¹⁸¹, daß, wie bereits erwähnt, im Gegensatz zur Tensorprodukt-Repräsentation P. SMOLENSKY's, die Dimension der resultierenden (Vektor-)Repräsentation auch bei der Anwendung auf komplexe, d.h. rekursive, kompositionale (Vektor-)Strukturen konstant bleibt, und jeder beliebige Füllervektor, zumindest näherungsweise im Wege des sog. "convolution decoding"¹¹⁸², rückrechenbar ist.

1181 S. z.B. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. PP. 97-100, 149-57.

1182 S. z.B. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. P. 100 – T. PLATE: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. P. 629. S. eingehend hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.1.03.2.

5.1.03 NEURAL ENGINEERING FRAMEWORK NACH Chr. ELIASMITH UND T.C. STEWART

5.1.03.1 Grundgelegt in dem Buch "NEURAL ENGINEERING: COMPUTATION, REPRESENTATION, AND DYNAMICS IN NEUROBIOLOGICAL SYSTEMS"¹¹⁸³ aus dem Jahr 2003 von Chr. ELIASMITH und dem U.S.-amerikanischen Neurobiologen Charles H. ANDERSON, haben der kanadische Philosoph und theoretische Neurowissenschaftler Chris ELIASMITH¹¹⁸⁴ und der kanadische Informatiker und Kognitionswissenschaftler Terrence C. STEWART¹¹⁸⁵ mit ihrem sog. "Neural Engineering Framework (NEF)"¹¹⁸⁶ eine neurobiologisch plausible Architektur zur nicht-symbolischen, neuronal inspirierten Theorie¹¹⁸⁷ der (semantischen) Kompositionalität i.S.d. sog. "variable bindings" (dt. „Variablenbindung")¹¹⁸⁸ entwickelt, im weiteren als „NEF-Architektur" bezeichnet, indem sie dieses (Rahmen-)Modell kombinieren mit den sog. "Holographic Reduced Representations (HRRs)" T.A. PLATE's¹¹⁸⁹, beruhend auf der mathematischen Operation der sog. „Zirkularkonvolution" (engl. "circular convolution").

5.1.03.2 Die NEF-Architektur läßt sich nun anhand von drei (Haupt-)Prinzipien des sog. "Neural Engineering" gem. Chr. ELIASMITH und Ch.H. ANDERSON i.S. der Theoretischen Neurowissenschaft (engl. "theoretical neuroscience")¹¹⁹⁰

¹¹⁸³ S. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003.

¹¹⁸⁴ Zur Person Chris ELIASMITH's siehe die Website <http://watarts.uwaterloo.ca/~celiasmi/>.

¹¹⁸⁵ Zur Person Terrence C. STEWART's siehe die Website <http://terrystewart.ca/?q=node/1>.

¹¹⁸⁶ Eingehend s. z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 610-14 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. PP. 1759-64 – T.C. STEWART / T. BEKOLAY / Chr. ELIASMITH: Neural Representations of Compositional Structures. Representing and Manipulating Vector Spaces with Spiking Neurons. Connection Science. Vol. 22. 2011. PP. 145-53 – Chr. ELIASMITH: Neural Engineering. Unraveling the Complexities of Neural Systems. IEEE Canadian Review. Vol. 43. 2003. PP. 13-15 – Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 346-69 – Chr. ELIASMITH: How we Ought to Describe Computation in the Brain. Studies in History and Philosophy of Science. Vol. 41. 2010. PP. 313-20.

S. auch Chr. ELIASMITH: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. Neural Computation. Vol. 17. 2005. PP. 1276-1314 – Chr. ELIASMITH: Mind as a Dynamical System. M.A. Thesis in Philosophy. University of Waterloo. Ontario. Canada. 1995.

¹¹⁸⁷ S. hierzu z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 596-98, 615.

S. aber M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 636, 637.

¹¹⁸⁸ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213.

¹¹⁸⁹ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.

¹¹⁹⁰ Einführend in die Theoretische Neurowissenschaft (engl. "theoretical neuroscience") s. z.B. P. DAYAN / L.F. ABBOTT: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001.

beschreiben¹¹⁹¹, u.z.:

1. Eine neuronale Repräsentation, bezogen auf das Verhalten einer Population von Neuronen über einen bestimmten Zeitraum hinweg, wird definiert anhand einer Kombination von nicht-linearer Kodierung (engl. "nonlinear encoding") (s. Formel.116) und optimal gewichteter linearer Dekodierung (engl. "linear decoding") (s. Formel.117 und Formel.118).
 2. Eine Transformation einer neuronalen Repräsentation besteht in der Funktion einer Variablen, die von einer neuronalen Population repräsentiert wird und zeichnet sich durch eine alternative gewichtete lineare Dekodierung aus (s. Formel.121 und Formel.122).
 3. Die neuronale Dynamik eines neurobiologischen Systems kann dadurch charakterisiert werden, daß eine neuronale Repräsentation als kontrolltheoretische Zustandsvariable i.S. der sog. „(mathematischen) Kontrolltheorie“ (engl. "(Mathematical) Control Theory")¹¹⁹² betrachtet wird.
- Diese drei Prinzipien kann man nach Chr. ELIASMITH und Ch.H. ANDERSON¹¹⁹³

¹¹⁹¹ Eingehend s. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 15-19, 30-40, 49-52, 230-31.

Einführend s. Chr. ELIASMITH: Neural Engineering. Unraveling the Complexities of Neural Systems. IEEE Canadian Review. Vol. 43. 2003. PP. 13-15, v.a. P. 13: "The resulting framework is effectively summarized by the following three principles:

1. Neural representations are defined by the combination of nonlinear encoding (exemplified by neuron tuning curves, and neural spiking) and weighted linear decoding (over populations of neurons and over time).
2. Transformations of neural representations are functions of the variables represented by neural populations. Transformations are determined using an alternately weighted linear decoding.
3. Neural dynamics are characterized by considering neural representations as control theoretic state variables. Thus, the dynamics of neurobiological systems can be analyzed using control theory.

In addition to these main principles, we take the following addendum to be important for analyzing neural systems:

· Neural systems are subject to significant amounts of noise. Therefore, any analysis of such systems must account for the effects of noise."

S. hierzu im einzelnen z.B. Chr. ELIASMITH: How we Ought to Describe Computation in the Brain. Studies in History and Philosophy of Science. Vol. 41. 2010. PP. 313-20 – Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 346-57, v.a. P. 347.

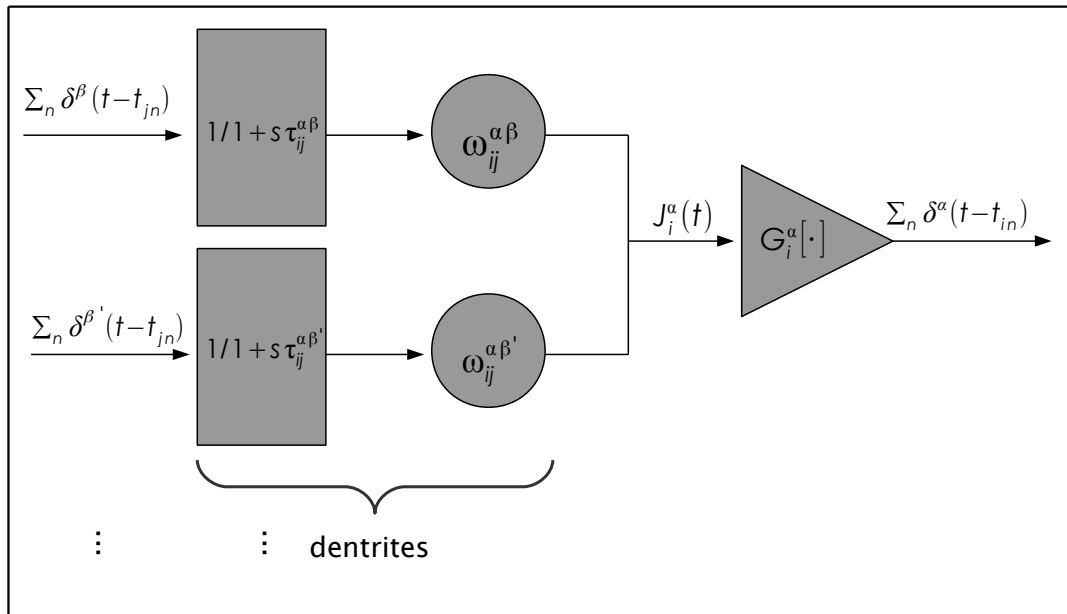
S. z.B. einführend Chr. ELIASMITH: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. Neural Computation. Vol. 17. 2005. P. 1277.

¹¹⁹² S. z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 219-74, v.a. PP. 221-31.

Grundlegend s. hierzu R.E. KALMAN: Contributions to the Theory of Optimal Control. Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana. Vol. 5. 1960. PP. 102-19 – R.E. KALMAN: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. ASME Journal of Basic Engineering. Vol. 82. 1960. PP. 35-45.

Einführend s. z.B. E.D. SONTAG: Mathematical Control Theory. 2. Aufl. Springer-Verlag. New York u.a. 1998 – D. HINRICHSSEN / A.J. PRITCHARD (Eds.): Mathematical Systems Theory I. Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010.

¹¹⁹³ S. z.B. Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 348-49.



Graphik.36: Schematisches Diagramm eines sog. „neuronalen Standard-Populationssubsystems“ (engl. “neuronal standard population subsystem”) im Rahmen des “Neural Engineering Framework (NEF)” gem. Chr. ELIASMITH und Ch.H. ANDERSON, das eine typische neuro-wissenschaftliche Beschreibung der neuronalen Funktion auf einer basalen Ebene wieder-gibt: Spike trains $\sum_n \delta^\beta(t-t_{jn})$ von verschiedenen vorgelagerten Populationen β gelangen zum synaptischen Spalt und induzieren mittels der Freigabe von Neurotransmittern einen Spannungswechsel in den postsynaptischen Dendriten der Neuronen der Population α . Die daraus sich ergebenden postsynaptischen Ströme (engl. “Postsynaptic Currents (PSCs)”) $1/1+s\tau_{ij}^{\alpha\beta}$ sind somit gefilterte Versionen der präsynaptischen Spike trains, die graduelle Ef-fekte auf den somatischen Strom (engl. “somatic current”) $J_i^\alpha(t) = \alpha_i \tilde{\phi}_i^\alpha \cdot x^\alpha(t) + J_i^{\alpha,bias}$ des post-synaptischen Neurons hervorrufen können, die anhand der synaptischen Gewichte $\omega_{ij}^{\alpha\beta}$ modelliert werden können. Danach entsteht ein hoch nicht-linearer Prozeß in Form der nicht-linearen Antwortfunktion (engl. “response function”) $G_i^\alpha[\cdot]$ im Soma des postsynapti-schen Neurons, der in einer Serie von Spikesequenzen $\sum_n \delta^\alpha(t-t_{in})$ resultiert, die zu den nachfolgenden neuronalen Populationen wandern (in Anlehnung an Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobio-logical Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. P. 226).

– möglichst realistisch die biophysikalischen Daten eines neuronalen Systems wiedergebend – quantitativ i.S. der Informations- und Signaltheorie im ein-zelnen wie folgt definieren, wobei im Rahmen des ersten Prinzips in der Theo-retischen Neurowissenschaft nicht nur der Kodierungsprozeß (engl. “encod-ing process”) zu beachten sei, d.h. der Vorgang, der das (Antwort-)Verhal-ten eines (sensorischen) Neurons auf eine physikalische (Umgebungs-)Varia-ble anhand einer Sequenz von neuronalen Aktionspotentialen (sog. “spike train (analysis)”) beschreibt¹¹⁹⁴, sondern, umgekehrt, vor allem auch der De-kodierungsprozeß (engl. “decoding process”), d.h. der Vorgang, der, ausge-hend von den Aktionspotentialsequenzen, im Prinzip, die Rekonstruktion des

1194 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.2.

originär kodierten Stimulus beschreibt. Desweiteren seien zwei Aspekte einer (neuronalen) Repräsentation zu unterscheiden, u.z. der temporale¹¹⁹⁵ und der distributive¹¹⁹⁶ Aspekt, sodaß man bei der quantitativen Analyse von einer Population oder Gruppe von Neuronen auszugehen hat, wobei die neuronale Aktivität $\alpha_i(x)$ eines der Neuronen i , d.h. seine im Rahmen eines sog. "Leaky Integrate-and-Fire (LIF) Model"¹¹⁹⁷ konstruierte sog. „Tuningkurve“ (engl. "tuning curve")¹¹⁹⁸, die einen (Stimulus-)Vektor $x(t)$ kodiert, wie folgt definiert wird¹¹⁹⁹:

$$\alpha_i(x(t)) = G_i \left[\alpha_i \tilde{\phi}_i \cdot x(t) + J_i^{bias} \right], \quad (116)$$

wobei G_i die nicht-lineare Antwortfunktion (engl. "response function")¹²⁰⁰ ist,

-
- 1195 S. z.B. Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 349-51, der hierbei auf das grundlegende mathematische Konzept der sog. "tuning curve" (dt. „Tuningkurve“) im Rahmen der temporalen Kodierung verweist sowie auf die beiden grundlegenden methodischen Konzepte des sog. "rate code view" vs. "timing code view" im Rahmen der temporalen Dekodierung.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.2, 3.24.1.
- 1196 S. z.B. Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): Oxford Handbook of Philosophy of Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 351-53, der hierbei auf die grundlegenden Experimente zum sog. „Populationsvektor“ (engl. "population vector") nach A.P. GEORGOPOULOS / A.B. SCHWARTZ / R.E. KETTNER: Neuronal Population Coding of Movement Direction. Science. Vol. 233. 1986. 1416-19 und A.P. GEORGOPOULOS / J.T. LURIOT / M. PETRIDES / A.B. SCHWARTZ / J.T. MASSEY: Mental Rotation of the Neuronal Population Vector. Science. Vol. 243. 1989. PP. 234-36 verweist.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.24.1.
- 1197 S. z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 36-37, 81-89.
Die Frage betreffend, ob im Rahmen des sog. „(allgemeinen) Bindungsproblems“ (engl. "(general) binding problem") in den Neuro- und Kognitionswissenschaften neben der Frequenzkodierung (engl. "((mean) firing) rate coding") ein temporaler Synchronisationsmechanismus i.S. der sog. „temporalen Kodierung“ (engl. "temporal coding") vorzuziehen sei, erachten Chr. ELIASMITH und Ch.H. ANDERSON dies für ihren Ansatz als irrelevant.
S. hierzu z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 89-91.
- 1198 S. im einzelnen hierzu z.B. E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): Principles of Neural Science. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. PP. 460-62 – A. POUGET / P.E. LATHAM: Population Codes. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 894.
S. auch Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 36-37, 50-51, 200-204, 204-206 – T.C. STEWART / T. BEKOLAY / Chr. ELIASMITH: Neural Representations of Compositional Structures. Representing and Manipulating Vector Spaces with Spiking Neurons. Connection Science. Vol. 22. 2011. PP. 145-53.
- 1199 S. hierzu z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 50-51, 52, 230 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 611 – Chr. ELIASMITH: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. Neural Computation. Vol. 17. 2005. P. 1278.
- 1200 S. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. P. 35: "(...) the response

α_i der Verstärker- oder Sensitivitätsfaktor (engl. "gain" oder "sensitivity factor") des Neurons i , $\tilde{\phi}_i$ der jedem der Neuronen in der Population zugewiesene, zu Beginn zufällig initialisierte sog. „Kodierungsvektor“ (engl. "encoding vector", auch mit "preferred direction vector"¹²⁰¹ bezeichnet), der jeweils dem Neuron zugewiesen wird, das bei der Präsentation eines bestimmten Stimulus am stärksten feuert, und J_i^{bias} ein „Hintergrundstrom“ (engl. "'background' current"), der die neuronale Hintergrundaktivität modelliert, sodaß eine Gruppe von Neuronen einen kompletten Vektor repräsentieren kann, dessen Dimensionsanzahl aber von der Anzahl der Neuronen in der Gruppe verschieden ist, und dessen (Repräsentations-)Genauigkeit jedoch mit der Anzahl der Neuronen steigt (s. Graphik.36).

Bei einem gegebenen Aktivitätsmuster, bestehend aus "spike trains" $\delta(t-t_{in})$, wobei der Index i die Neuronen in einer Population bezeichnet, und der Index n die Spikes, die von einer Population an die nächste weitergeleitet werden, kann man nun, umgekehrt, im Wege einer Approximation ermitteln, welcher vormals kodierte (Stimulus-)Vektor $x(t)$ gerade repräsentiert wird, u.z. mittels einer sog. „Dekodierungsfunktion“ (engl. "decoding function") $h_i(t)$ im Rahmen eines sog. „optimalen linearen Dekoders“ (engl. "optimal linear decoder") ϕ_i^x ^{1202,1203}:

function $G[\cdot]$, is determined by the intrinsic properties of the neuron. These include the resistances, capacitances, absolute refractory period, etc. that are typically used to model single neuron behavior. Notably, this framework does not depend on the response function being determined by any particular set of intrinsic properties. (...) various neural models, each with their own characterization of $G[\cdot]$, can be used to model single neuron behavior."

- 1201 S. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. P. 51: "The vector $\tilde{\phi}_i$ is called the *preferred direction vector* of a cell with this kind of response. This is because, for a given vector magnitude, the cell responds most strongly to inputs whose direction aligns with the preferred direction vector (...). So, the vector is 'preferred' because it causes the highest firing rate for a given magnitude and it is a 'direction' because it has a particular orientation in some (possibly high-dimensional) vector space."
- 1202 S. hierzu z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 38, 39, 43, 51, 52, 92-105, 231, 301, 319-23, v.a. PP. 97-98 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 611 – Chr. ELIASMITH: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. Neural Computation. Vol. 17. 2005. P. 1278.
- 1203 S. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. PP. 16-17: "It is important to emphasize that analyzing neurons as decoding signals using (optimal) linear or nonlinear filters does not mean that neurons are presumed to *explicitly use* optimal filters. In fact, according to our account, there is no directly observable counterpart to these optimal decoders. Rather, the decoders are 'embedded' in the synaptic weights between neighboring neurons. That is, coupling weights of neighboring neurons indirectly reflect a particular population decoder, but they are not identical to the population decoder, nor can the decoder be unequivocally 'read-off' of the weights. This is because connection weights are determined by both the decoding of incoming signals *and* the encoding of the outgoing signals (...)."

$$\hat{x}(t) = \sum_i \alpha_i(x(t)) \phi_i^x \text{ mit } \alpha_i(x(t)) = \sum_n h_i(t) * \delta(t-t_{in}) \text{ und } \phi_i^x = \Gamma^{-1} \Upsilon, \quad (117)$$

$$\text{wobei } \Gamma_{ij} = \int \alpha_i(x) \alpha_j(x) dx \text{ und } \Upsilon_j = \int \alpha_j(x) x dx. \quad (118)$$

Damit man nun ein neurobiologisch plausibles Modell bestehend aus kompositionalen Repräsentationen erhält, hat man die optimalen synaptischen Verbindungsgewichte zwischen zwei Gruppen von Neuronen derart zu bestimmen¹²⁰⁴, daß eine gewünschte (Transformations-)Funktion $f(x)$ definiert wird, u.z., in diesem Fall, die Funktion einer zirkularen Konvolution aus zwei (Eingabe-)Vektorvariablen, sodaß die (Aktivitäts-)Werte aus diesen zwei neuronalen Gruppen zusammengebunden werden können zu einer kompositionalen HRRs-Struktur, entsprechend einem sog. „optimalen linearen Funktionsdeko-der“ (engl. „optimal linear function decoder“)¹²⁰⁵:

$$\hat{f}(x(t)) = \sum_i \alpha_i(x(t)) \phi_i^f \text{ mit } \phi_i^f = \Gamma^{-1} \Upsilon, \quad (121)$$

$$\text{wobei } \Gamma_{ij} = \int \alpha_i(x) \alpha_j(x) dx \text{ und } \Upsilon_j = \int \alpha_j(x) f(x) dx. \quad (122)$$

5.1.03.3 Die NEF-Architektur Chr. ELIASMITH's und T.C. STEWART's hat nun verschiedene Anwendungen erfahren¹²⁰⁶, z.B. in einem Modell des auditorischen Systems der Schleiereule¹²⁰⁷, im Pfadintegrationsmechanismus (engl.

1204 Nach T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 612 wird dazu die folgende Formel verwendet:

$$\omega_{ij} = \alpha_j \tilde{\phi}_j \cdot \phi_i, \quad (119)$$

wobei dies einer Übertragung von Information von einer Gruppe A mit i Neuronen zu einer Gruppe B mit j Neuronen entspricht.

S. auch T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. PP. 1761.

Nach T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. P. 1762 kann man jedoch auch eine lernfähige Transformationsfunktion verwenden gemäß:

$$\Delta \omega_{ij} = -\kappa \left(\sum_i \omega_{ij} \alpha_i - \sum_j \omega_{ij} b_j \right), \quad (120)$$

wobei (α_i) eine gewünschte Eingabeaktivierung darstellt und (b_j) die entsprechenden Ausgabeaktivierungen.

1205 S. hierzu z.B. Chr. ELIASMITH / Ch.H. ANDERSON: Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems. MIT Press. Cambridge/MA. 2003. P. 231 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 610-13 – Chr. ELIASMITH: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. Neural Computation. Vol. 17. 2005. P. 1279.

1206 S. z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 610, 614.

1207 S. B. FISCHER: A Model of the Computations Leading to a Representation of Auditory Space in

“path integration mechanism”) bei der Ratte¹²⁰⁸, im Schwimm- und Fluchtmechanismus beim Zebrafisch¹²⁰⁹, beim translationalen vestibulo-okulären Reflex des Makaken¹²¹⁰, sowie in einem Modell des Arbeitsgedächtnisses¹²¹¹ und bei der Implementation eines neuronalen Produktionssystems¹²¹².

5.1.03.4 Ferner bieten Chr. ELIASMITH und T.C. STEWART ein Open-Source-Softwarepaket namens NENGO¹²¹³ an, das ein graphisches Interface zur Konstruktion von kognitiven (Netzwerk-)Modellen auf der Basis des Neural Engineering Framework zur Verfügung stellt.

5.1.03.5 Zusammenfassend kann man abschließend sagen¹²¹⁴, daß mit der Kombination des Neural Engineering Framework mit den Holographic Reduced Representations ein neurobiologisch plausibles Modell der (semantischen) Kompositionalität entwickelt worden ist, wobei es sich – entsprechend den experimentellen Daten aus den (kognitiven) Neurowissenschaften – sowohl als sehr robust zeigt gegenüber einem zunehmenden Verlust an Neuronenressourcen (sog. “graceful degradation”)¹²¹⁵ oder einem zunehmenden (Hintergrund-)Rauschen (engl. “(background) noise”), als auch dessen Leistungsgenauigkeit, wie bereits z.T. erwähnt, mit zunehmender Anzahl der Neuronenressourcen ansteigt, jedoch bei zunehmender Komplexität der (Vektor-)Strukturen abnimmt. Ferner überzeugt die berechnete Gesamtanzahl der Neuronen mit 1.4 Millionen, was etwa einem Gebiet von 9 mm² des Kortex entsprechen würde, bezogen auf komplexere, implementierte algebraische Operationen zwischen verschiedenen neuronalen Gruppen, sodaß dieselbe Population von Neuronen für jede zu vollziehende (Variablen-)Kodierung und (Variablen-)Decodierung verwendet werden würde. Desweiteren kann man das Neural Engineering Framework – unter wissenschaftstheoretischer Perspektive betrachtend – als eine in hohem Grad empirisch testbare Theorie auffassen, da sie eine Vielzahl von meßbaren neurophysiologischen Variablen, wie z.B. “tuning curves”¹²¹⁶, “spike rates”, “spike patterns”, “somatic currents” etc., verwendet.

the Midbrain of the Barn Owl. PhD Thesis. Washington University St. Louis. 2005.

1208 S. J. CONKLIN / Chr. ELIASMITH: An Attractor Network Model of Path Integration in the Rat. *Journal of Computational Neuroscience*. Vol. 18. 2005. PP. 183-203.

1209 S. D. KUO / Chr. ELIASMITH: Integrating Behavioral and Neural Data in a Model of Zebrafish Network Interaction. *Biological Cybernetics*. Vol. 93. 2005. PP. 178-87.

1210 S. Chr. ELIASMITH / M.B. WESTOVER / Ch.H. ANDERSON: A General Framework for Neurobiological Modeling: An Application to the Vestibular System. *Neurocomputing*. 46. 2002. PP. 1071-76.

1211 S. R. SINGH / Chr. ELIASMITH: Higher-Dimensional Neurons Explain the Tuning and Dynamics of Working Memory Cells. *Journal of Neuroscience*. Vol. 26. 2006. PP. 3667-78.

1212 S. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): *Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. PP. 1759-64.

1213 S. hierzu unter der Website <http://nengo.ca/>.

1214 S. z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 613-15 – Chr. ELIASMITH: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): *The Oxford Handbook of Philosophy and Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 360-66.

1215 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.282, Fn. 455.

1216 S. Fn. 1198.

5.1.04 LEARNING AND INFERENCE WITH SCHEMAS AND ANALOGIES NACH J.E. HUMMEL UND K.J. HOLYOAK

5.1.04.1 Eine konnektionistische Implementation eines klassischen Symbolsystems mit einem gemischt distribuierten und lokalen Repräsentationsformat in Verbindung mit einer dynamischen Bindung (engl. "dynamic binding") haben die U.S.-amerikanischen Psychologen und Kognitionswissenschaftler John E. HUMMEL¹²¹⁷ und Keith J. HOLYOAK¹²¹⁸ mit ihrem annähernd neurobiologisch plausiblen¹²¹⁹, Schema-basierten sog. "Learning and Inference with Schemas and Analogies (LISA) Model"¹²²⁰, im weiteren als „LISA-Architektur“ bezeichnet, vorgenommen, eine auf dem Bindungsmechanismus¹²²¹ der (Phasen-)Synchronizität¹²²² basierende Architektur, in der eine komplex struk-

1217 Zur Person John E. HUMMEL's siehe die Website <http://www.psychology.illinois.edu/people/jehummel>.

1218 Zur Person Keith J. HOLYOAK's siehe die Website <http://reasoninglab.psych.ucla.edu/KeithV.htm>.

1219 Kritisch dazu s. z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 599-602.

1220 Grundlegend s. z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Distributed Representation of Structure: A Theory of Analogical Access and Mapping. *Psychological Review*. Vol. 104. 1997. PP. 427-66, v.a. PP. 433-34, 435-42, mit Abbildungen zur Architektur (PP. 436, 438, 439, 440) – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. *Psychological Review*. Vol. 110. 2003. PP. 220-64, v.a. PP. 221-34, mit Abbildungen zur Architektur (PP. 222, 224, 225, 227).

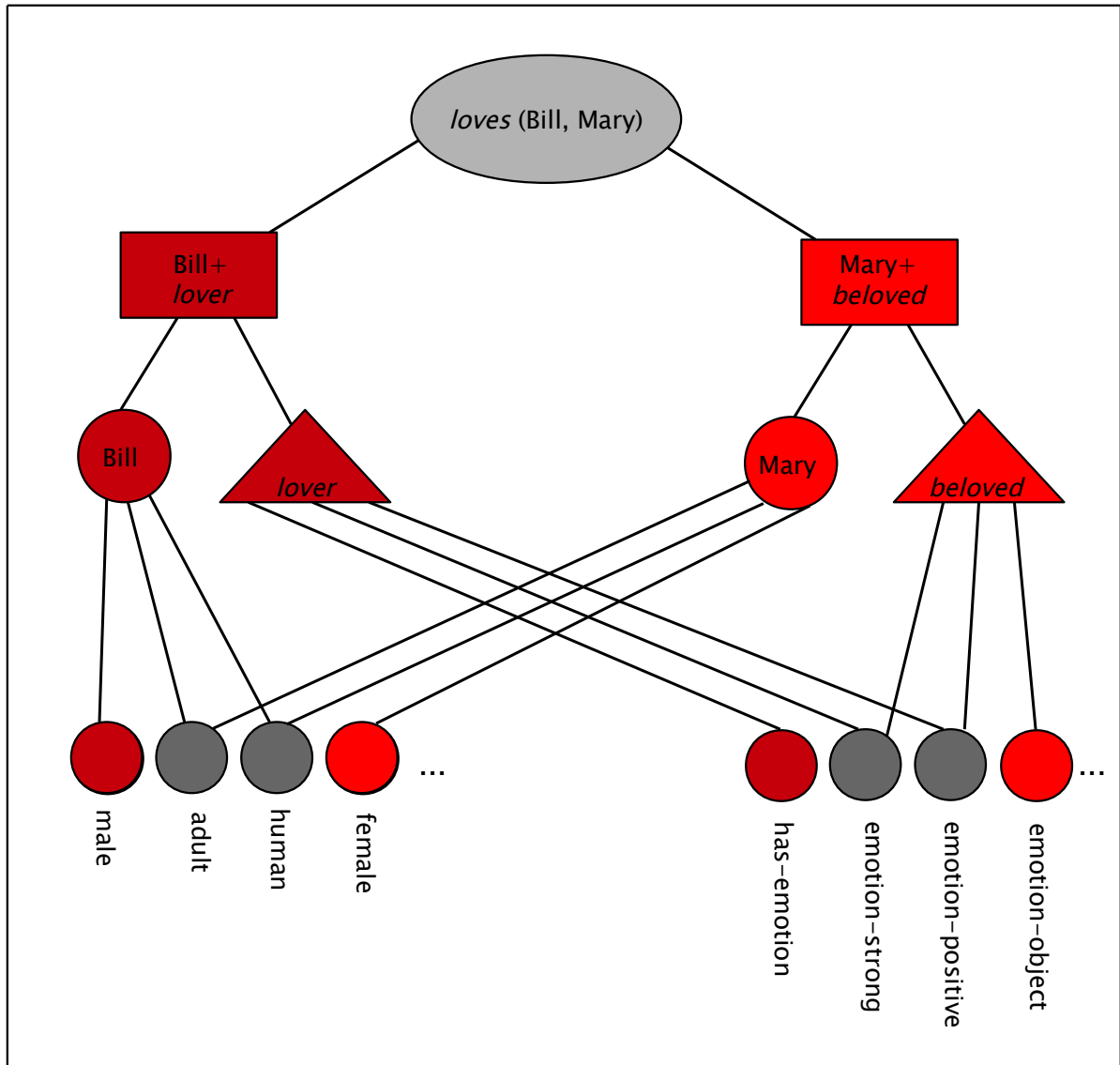
Einen Überblick bietet z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally-Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society*. Vol. 10. 2003. PP. 58-75 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Current Directions in Cognitive Science*. Vol. 14. 2005. PP. 153-57.

Zum Vorläufermodell des sog. "Direct Mapping Model (DMM)" und des sog. "Indirect Mapping Model (IMM)" s. z.B. J.E. HUMMEL / B. BURNS / K.J. HOLYOAK: Analogical Mapping by Dynamic Binding: Preliminary Investigations. In: K.J. HOLYOAK / J.A. BARNDEN (Eds.): *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory*. Vol. 2. Analogical Connections. Ablex Publishing. Norwood/NJ. 1994. PP. 416-45, v.a. PP. 423-33, 433-44 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Indirect Analogical Mapping. In: *Proceedings of the Fourteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 516-21, v.a. PP. 517-19 – J.E. HUMMEL / E.R. MELZ / J. THOMPSON / K.J. HOLYOAK: Mapping Hierarchical Structures with Synchrony for Binding: Preliminary Investigations. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 433-38, v.a. PP. 434-36.

Kritisch dazu s. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 95-96 – Fr. VAN DER VELDE / M. DE KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. *Brain and Mind*. Vol. 3. 2002. PP. 304-305.

1221 S. hierzu einfürend J.E. HUMMEL: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 85-86.

1222 S. z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Distributed Representation of Structure: A Theory of Analogical Access and Mapping. *Psychological Review*. Vol. 104. 1997. PP. 433-35, 37-41 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. *Psychological Review*. Vol. 110. 2003. PP. 223-25 – J.E. HUMMEL / B. BURNS / K.J. HOLYOAK: Analogical Mapping by Dynamic Binding: Preliminary Investigations. In: K.J. HOLYOAK / J.A. BARNDEN (Eds.): *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory*. Vol. 2. Analogical



Graphik.37: Schematisches Diagramm der Repräsentation 'loves(Bill, Mary)' im sog. "Learning and Inference with Schemas and Analogies (LISA) Model" von J.E. HUMMEL und K.J. HOLYOAK im Rahmen des Arbeitsgedächtnisses, bestehend aus vier Verarbeitungsebenen: (1) Subsymbole, z.B. 'male', (2) Symbole, z.B. 'Bill', 'lover', (3) Subpropositionen, z.B. 'Bill+lover', und (4) Propositionen, z.B. 'loves(Bill, Mary)'. Solche Neuronen, die nur dann synchron aktiv sind mit den Symbolen 'Bill' und 'lover' ('Mary' und 'beloved') sind dunkelrot (hellrot) gezeichnet, und solche Neuronen, die sowohl mit den Symbolen 'Bill' und 'lover' als auch mit den Symbolen 'Mary' und 'beloved' synchron aktiv sind, sind grau gezeichnet, wobei der Synchronisationsmechanismus dem bei der SHRUTI Architecture L. SHASTRI's entspricht (in Anlehnung an J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. Psychological Review. Vol. 110. 2003. P. 225).

Connections. Ablex Publishing. Norwood/NJ. 1994. PP. 422-23 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. Current Directions in Cognitive Science. Vol. 14. 2005. P. 154 mit Bezug auf die (Synchronisations-)Bindungshypothese (engl. "binding-by-synchrony hypothesis") W. SINGER's, A.K. ENGEL's und P. KÖNIG's et. al. und auf das (Synchronisations-)Bindungskonzept von L. SHASTRI und V. AJ-JANAGADDE.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.4 und 5.1.05.

turierte Repräsentation i.S. von sog. „Rolle-Füller Bindungen“ (engl. “filler-role bindings”)¹²²³ aus einer Vermengung von distribuierten und lokalen elementaren Repräsentationen konstruiert wird (engl. “symbolic connectionism”)¹²²⁴, wobei sich dies im Rahmen einer hierarchischen Struktur von vier Verarbeitungsebenen vollzieht (s. Graphik.37), u.z. wie folgt: (1) Subsymbole (engl. “subsymbols”), z.B. 'male', 'female', 'has-emotion', 'emotion-object', (2) Symbole (engl. “symbols”), z.B. 'Bill', 'Mary', 'lover', 'beloved', (3) Subpropositionen (engl. “subpropositions”), z.B. 'Bill+lover', 'Mary+beloved' und (4) Propositionen (engl. “propositions”), z.B. 'loves(Bill, Mary)'.¹²²⁵

5.1.04.2 Zusammen mit I. BIEDERMAN entwirft J.E. HUMMEL desweiteren ein Modell (“JIM model”)¹²²⁶ zur visuellen Objekterkennung, und J.E. HUMMEL und K.J. HOLYOAK et al. befassen sich eingehend mit der Kompositionalitätsproblematik, wobei sie die Verwendung eines rein dynamischen temporalen (Synchronisations-)Bindungsmechanismus (engl. “temporal coding”) auf das

¹²²³ S. im einzelnen z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Distributed Representation of Structure: A Theory of Analogical Access and Mapping. *Psychological Review*. Vol. 104. 1997. PP. 433-35 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. *Psychological Review*. Vol. 110. 2003. PP. 221-24 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Current Directions in Cognitive Science*. Vol. 14. 2005. PP. 154-55 – J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITUR / D.J. KALAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): *Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAI Fall Symposium*. AAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31–34 mit Bezug auf die sog. Tensorprodukt-Repräsentation (engl. “tensor product representation”) i.S. P. SMOLENSKY's.

Siehe die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.213.

¹²²⁴ S. z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Current Directions in Cognitive Science*. Vol. 14. 2005. P. 154.

¹²²⁵ S. im einzelnen z.B. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Current Directions in Cognitive Science*. Vol. 14. 2005. PP. 154-55.

Einführend s. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. *Brain and Mind*. Vol. 3. 2002. PP. 295, 299-305: “In their model, synchrony is used to bind arguments to predicate roles. For example, in the case of the proposition *John loves Mary*, there is a synchronous activation of the unit that represents *John* and the unit that represents the agent role of *love*, and a (different-phase) synchronous activation of the unit that represents *Mary* and the unit that represents the patient (theme) role of *love*.”

¹²²⁶ S. z.B. J.E. HUMMEL / I. BIEDERMAN: Dynamic Binding: A Basis for the Representation of Shape by Neural Networks. In: *Proceedings of the Twelfth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Hillsdale, NJ. 1990. PP. 614-21 – J.E. HUMMEL / I. BIEDERMAN: Dynamic Binding in a Neural Network for Shape Recognition. *Psychological Review*. Vol. 99. 1992. PP. 480–517 – J.E. HUMMEL: Complementary Solutions to the Binding Problem in Vision: Implications for Shape Perception and Object Recognition. *Visual Cognition*. Vol. 8. 2001. PP. 489-517, v.a. PP. 493-500. Einführend s. z.B. Sh. EDELMAN / N. INTRATOR: Object Structure, Visual Processing. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 797-800, v.a. PP. 798, 799.

S. hierzu auch Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. *Brain and Mind*. Vol. 3. 2002. PP. 291-312.

Arbeitsgedächtnis (engl. "working memory") beschränkt wissen wollen, wohingegen dieser dann um den (Bindungs-)Mechanismus der sog. „konjunkti-ven Kodierung“ (engl. "conjunctive coding")¹²²⁷ für die Abspeicherung im Langzeitgedächtnis (engl. "longterm memory (LTM)") ergänzt werden muß.¹²²⁸

1227 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. P. 2.

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kpt. 6.4.

1228 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. P. 3.

5.1.05 SHRUTI ARCHITECTURES NACH L. SHASTRI

5.1.05.1 In dem Bestreben, das unbewußte, schnelle Schließen des Menschen (sog. „reflexives Schließen“ (engl. “reflexive reasoning”)) zu simulieren, entwickelte der indische (Neuro-)Informatiker Lokendra SHASTRI¹²²⁹, vor allem zusammen mit V. AJJANAGADDE, D.R. MANI und J.C. WENDELKEN, ein massiv paralleles System namens SHRUTI (Architecture)¹²³⁰, im weiteren als „SHRU-

1229 Zur Person Lokendra SHASTRI's siehe die Website <http://www.icsi.berkeley.edu/~shastri/>.

1230 Grundlegend s. z.B. V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Efficient Inference with Multiplace Predicates and Variables in a Connectionist System. In: Proceedings of the Eleventh Conference of the Cognitive Science Society. Ann-Arbor/MI. 1989. PP. 396-403 – L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. 1990. University of Pennsylvania. Department of Computer and Information Science. Report No. MS-CIS-90-05 and in Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. No. 3. 1993. PP. 417-94 – D.R. MANI / L. SHASTRI: Reflexive Reasoning with Multiple Instantiation in a Connectionist Reasoning System with a Type Hierarchy. Connection Science. Vol. 5. 1993. PP. 205-42 – L. SHASTRI: Temporal Synchrony, Dynamic Bindings, and SHRUTI: A Representational but Non-Classical Model of Reflexive Reasoning. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 19. 1996. 331-37 – L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. PP. 79-108 – L. SHASTRI: SHRUTI: A Neurally Motivated Architecture for Rapid, Scalable Inference. In: B. HAMMER / P. HITZLER (Eds.): Perspectives of Neural-Symbolic Integration. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2007. PP. 183-203.

S. auch L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: A Connectionist System for Rule Based Reasoning with Multi-Place Predicates and Variables. Technical Report MS-CIS-89-06. University of Pennsylvania. Department of Computer and Information Science. Philadelphia. 1989. PP. 1-21 – V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Efficient Inference with Multiplace Predicates and Variables in a Connectionist System. In: Proceedings of the Eleventh Conference of the Cognitive Science Society. Ann-Arbor/MI. 1989. PP. 396-403 – L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings. Technical Report MS-CIS-90-05. Department of Computer and Information Science. University of Pennsylvania. 1990 – L. SHASTRI: Connectionism and the Computational Effectiveness of Reasoning. Theoretical Linguistics. Vol. 16. No. 1. 1990. PP. 65-87 – V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Rules and Variables in Neural Nets. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 121-34 – D.R. MANI / L. SHASTRI: A Connectionist Solution to the Multiple Instantiation Problem Using Temporal Synchrony. In: Proceedings of the Fourteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. July 29 to August 1, 1992. Bloomington, Indiana. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 974-79.

Einführend s. z.B. L. SHASTRI: Structured Connectionist Models. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1116-19, v.a. PP. 1117-18 – J.C. WENDELKEN: SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003. PP. 10-43 – D.R. MANI: The Design and Implementation of Massively Parallel Knowledge Representation and Reasoning Systems: A Connectionist Approach. Ph.D. Dissertation. Department of Computer and Information Science. University of Pennsylvania. 1995. PP. 7-18 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 166-70 – J. WUNDERLICH: Erweiterung des RNN-Modelles um SHRUTI-Konzepte: Vom aussagenlogischen zum Schließen über prädikatenlogischen Programmen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1998. S. 22-45.

Kritisch dazu s. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. Brain and Mind. Vol. 3. 2002. PP. 291-312, v.a. PP. 304-307 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 94-95 – A. BROWNE /

TI-Architektur“ bezeichnet, eine konnektionistische Wissensbasis i.S. des sog. „strukturierten Konnektionismus“ (engl. “structured connectionism”)¹²³¹, die als ein semantisches neuronales Netzwerk realisiert ist, und sich dadurch auszeichnet, daß es aus einer hohen Anzahl an Fakten und Regeln, aber mit einer eingeschränkten Klasse von Klauseln innerhalb von wenigen Millisekunden anhand von speziellen Inferenzmechanismen komplexe formale Schlußfolgerungen i.S. der Prädikatenlogik¹²³² durchführen kann.¹²³³ Desweiteren ist es dadurch gekennzeichnet, daß die Variablen/Argument-Bindung i.S. der sog. „Rolle/Füller-Bindungen“ (engl. “filler-role bindings”)¹²³⁴ über die Verwen-

R. SUN: Connectionist Variable Binding. Expert Systems. Vol. 16. 1999. PP. 189-207, v.a. PP. 197-99 – J. HENDERSON: Connectionist Syntactic Parsing Using Temporal Variable Binding. Journal of Psycholinguistic Research. Vol. 23. 1994. PP. 354-55, 358-62 – N.S. PARK / D. ROBERTSON / K. STENNING: Extension of the Temporal Synchrony Approach to Dynamic Variable Binding in a Connectionist Inference System. Knowledge-Based Systems. Vol. 8. 1995. PP. 345-57, v.a. PP. 346-50.

1231 S. hierzu z.B. D.R. MANI: The Design and Implementation of Massively Parallel Knowledge Representation and Reasoning Systems: A Connectionist Approach. Ph.D. Dissertation. Department of Computer and Information Science. University of Pennsylvania. 1995. P. 8 – J.C. WENDELKEN: SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003. PP. 13-14.

1232 S. z.B. L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. 1993. PP. 428-34, v.a. PP. 428-29:

“The reasoning system can encode rules of the form: (...)

$$\forall x_1, \dots, x_m [P_1(\dots) \wedge P_2(\dots) \dots \wedge P_n(\dots) \Rightarrow \exists z_1, \dots, z_l Q(\dots)] \quad (123)$$

The arguments of P_i s are elements of $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. An argument of Q is either an element $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, or an element of $\{z_1, z_2, \dots, z_l\}$, or a constant. It is required that any variable occurring in multiple argument positions in the antecedent of a rule must also appear in the consequent.”

1233 S. z.B. L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. 1993. P. 428, wo das Modell noch als sog. “Backward-Reasoning System” bezeichnet wird, das i.S. G. HATFIELD's als ein “rule instantiating system” beschrieben werden kann.

1234 S. z.B. L. SHASTRI: SHRUTI: A Neurally Motivated Architecture for Rapid, Scalable Inference. In: B. HAMMER / P. HITZLER (Eds.): Perspectives of Neural-Symbolic Integration. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2007. PP. 187, 189 – L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. PP. 88-89 – L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. 1993. PP. 417-94, v.a. PP. 420-28 – V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Rules and Variables in Neural Nets. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 123-30.

S. auch z.B. J.C. WENDELKEN: SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003. PP. 16-17 – J. WUNDERLICH: Erweiterung des RNN-Modelles um SHRUTI-Konzepte: Vom aussagenlogischen zum Schließen über prädikatenlogischen Programmen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1998. S. 24-28.

Einführend s. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. Brain and Mind. Vol. 3. 2002. PP. 295, 305: “In their model synchrony of activation is used to show how a known fact such as *John gives Mary a book* can result in an inference such as *Mary owns a book*. The proposition *John*

dung von temporalen Synchronisationsmechanismen¹²³⁵ erfolgt (s. Graphik.38), und die Objekte, wie z.B. Konzepte, Individuen und Attribute, als strukturierte Repräsentationen lokal repräsentiert werden¹²³⁶, aufgebaut auf dem (Grund-)Schema des sog. „funktional fokalen Clusters“ (engl. “Functional Focal Cluster (FFC)”) ¹²³⁷, der als ein neuronaler Koinzidenzdetektor-Schalt-

gives Mary a book is represented by a coincidence detector (or 'fact node') that detects the respective synchrony in activation between the nodes for *John*, *Mary* and *book*, and the nodes for *giver*, *recipient* and *give-object*, that represent the thematic roles of the predicate *give* (x,y,z). The reasoning process results in the respective synchronous activation of the nodes for *owner* and *own-object* of the predicate *own*(y,z) with the nodes for *recipient* and *give-object* of the predicate *give*(x,y,z). As a result, the node for *Mary* is in synchrony with the node for *owner* and the node for *book* is in synchrony with the node for *own-object*. Hence, the proposition *Mary owns a book* can now be detected by a coincidence detector (fact node)."

1235 S. z.B. L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. 1993. PP. 439-41 und V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Rules and Variables in Neural Nets. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 130-31, die sich dabei u.a. auch auf die sog. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis" i.S. W. SINGER's, A.K. ENGEL's und P. KÖNIG's et al. berufen.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.4.

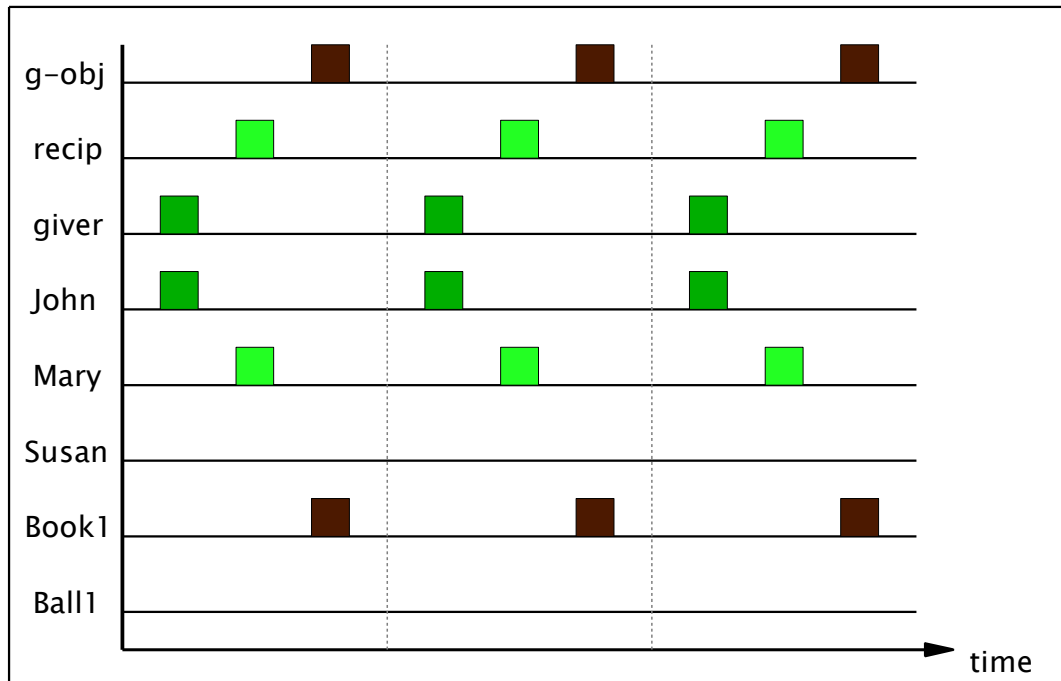
1236 Einführend s. z.B. J.C. WENDELKEN: SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003. PP. 14-16. Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.222.

1237 S. z.B. L. SHASTRI: SHRUTI: A Neurally Motivated Architecture for Rapid, Scalable Inference. In: B. HAMMER / P. HITZLER (Eds.): Perspectives of Neural-Symbolic Integration. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2007. PP. 187-92, v.a. PP. 187-88 – L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. PP. 84-87.

Zusammenfassend s. z.B. L. SHASTRI: Structured Connectionist Models. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1118: "SHRUTI can encode a large body of semantic and causal knowledge, and yet perform inferences required to establish referential and causal coherence within several hundred milliseconds (...). For example, given the story fragment 'John fell in the hallway. Tom had cleaned it,' SHRUTI can rapidly infer that *it* refers to the hallway, the hallway floor was wet because Tom had cleaned it, and John probably fell because he slipped on the wet floor.

SHRUTI encodes relational knowledge (e.g., event frames and action schemas) using neural circuits composed of focal clusters. The focal cluster of a relation P consists of a node $+:P$ whose activity indicates that the system is making an assertion about an instance of P , a node $?:P$ whose activity indicates that the system is seeking an explanation about an instance of P , and role nodes, one for each role associated with P . A dynamic binding between a role and an entity filling that role in a given situation is represented by the synchronous firing of the role and entity nodes. For example, the event 'John fell in the hallway' is represented by a *rhythmic* pattern of activity wherein the node $+:fall$ fires, the node $+:John$ fires in synchrony with the role node *fall-patient*, and the node $+:hallway$ fires in synchrony with the role node *fall-location*. A systematic mapping between relations (and other rule-like knowledge) is encoded by high-efficacy links between focal clusters. For example, the knowledge 'falling can lead to getting hurt' is encoded by directed links from $+:fall$ to $+:hurt$ and $?:hurt$ to $?:fall$, and by two-way links between *fall-patient* and *hurt-patient* and between *fall-location* and *hurt-location*. Given the above connectivity, the state of activation encoding 'John fell in the hallway' evolves so that the role *hurt-patient* starts firing in synchrony with the role *fall-patient* (and hence, with $+:John$), and the role *hurt-location* starts firing in synchrony with the role *fall-location* (and hence, with $+:hallway$). The resulting firing pattern represents not only the event 'John fell in the hallway', but also the infer-

kreis (engl. "coincidence detector circuit")¹²³⁸ aufgefaßt werden kann (s. Graphik.39).

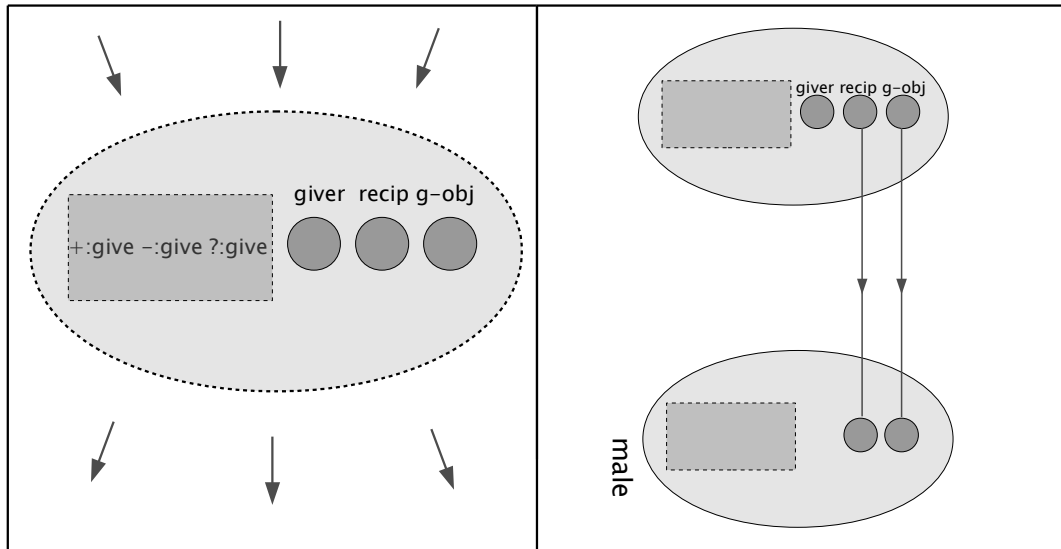


Graphik.38: Die zeitlich dynamische Bindung von (Term-)Argumenten ($\langle \text{giver} = \text{John} \rangle$, $\langle \text{recipient} = \text{Mary} \rangle$, $\langle \text{give-object} = a\text{-Book} \rangle$) anhand des Prinzips der temporalen Synchronizität an das 3-stellige Prädikat *give*, wobei die folgende Formel bzw. folgender Fakt repräsentiert wird: $\text{give}(\text{John}, \text{Mary}, a\text{-Book})$, d.h. die (Individuen-)Konstante *John* wird als Füller (engl. "filler") z.B. an die (syntaktische) Rolle (engl. "role") *giver* gebunden usw., indem die Neuronen des Ensembles des betreffenden Knotens, z.B. für die Terme *John* und *giver*, zeitgleich feuern, vereinfachend angedeutet durch das Aufzeichnen eines Aktionspotentials (in Anlehnung an L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. P. 88 und L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. 1993. P. 424).

red event 'John got hurt in the hallway.' Thus SHRUTI is able to infer that John got hurt in the hallway, given that John fell in the hallway."

Einführend s. z.B. J.C. WENDELKEN: SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003. PP. 20-22 – J. WUNDERLICH: Erweiterung des RNN-Modelles um SHRUTI-Konzepte: Vom aussagenlogischen zum Schließen über prädikatenlogischen Programmen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1998. S. 27-28.

1238 S. z.B. L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. PP. 79, 80, 89, 90 – V. AJJANAGADDE / L. SHASTRI: Rules and Variables in Neural Nets. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 129-130.



Graphik.39: Schematisches Diagramm eines sog. „funktional fokalen Clusters“ (engl. “Functional Focal Cluster (FFC)”) am Beispiel der 3-stelligen Relation 'give' (linkes Graphiksegment), bestehend aus den drei thematischen Rollen 'giver node', 'recipient node' und 'give-object node', die auf Grund deren synchroner Aktivität dynamisch gebunden sind z.B. an die individuellen Konzepte 'John', 'Mary' und 'a-book', der sog. 'enabler node ?:give', dessen Aktivierung bedeutet, daß das System die Tatsache 'John gives May a book' dahingehend überprüft, ob sie mit irgendeinem im (System-)Gedächtnis gespeicherten Ereignis übereinstimmt, oder von ihm abgeleitet werden kann, und den sog. 'collector node +:give' ('collector node -:give'), dessen Aktivierung bedeutet, daß das System den Sachverhalt 'John gives May a book' bestätigt (widerlegt). Eine Inferenz oder eine Regel, z.B.

$$\forall x, y, z [give(x, y, z) \Rightarrow own(y, z)], \quad (124)$$

kann dann derart kodiert werden, unter Hinzunahme der 2-stelligen Relation 'own', bestehend aus den zwei thematischen Rollen 'owner node' und 'own-object node', indem eine Verbindung hergestellt wird zwischen der thematischen Rolle der Antezedenzrelation und der korrespondierenden thematischen Rolle der Konsequenzrelation, hier z.B. zwischen 'recipient node' und 'owner node' sowie zwischen 'give-object node' und 'own-object node' (rechtes Graphiksegment).

(L. SHASTRI: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. Applied Intelligence. Vol. 11. 1999. P. 84 und L. SHASTRI / V. AJJANAGADDE: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 16. No. 3. 1993. P. 425).

5.1.05.2 Die SHRUTI-Architektur hat zahlreiche Anwendungen erfahren¹²³⁹,

¹²³⁹ S. z.B. L. SHASTRI / C. WENDELKEN: Seeking Coherent Explanations – a Fusion of Structured Connectionism, Temporal Synchrony, and Evidential Reasoning. In: Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference of the Cognitive Science Society. Philadelphia, Pennsylvania. August, 2000. Erlbaum. Mahwah /NJ. 2000. PP. 453-58 – L. SHASTRI: Types and Quantifiers in SHRUTI – Connectionist Model of Rapid Reasoning and Relational Processing. In: S. WERMTER / R. SUN: Hybrid Neural Systems. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 28-45 – C. WENDELKEN / L. SHASTRI: Acquisition of Concepts and Causal Rules in SHRUTI. In: R. ALTERMAN / D. HIRSH (Eds.): Proceedings of the 25th Conference of the Cognitive Science Society. Vol. 2. July 31st - Aug 2nd 2003. Boston/ MA. 2003.

und es erfolgte eine Weiterentwicklung z.B. von N.S. PARK, D. ROBERTSON und K. STENNING¹²⁴⁰ oder von J.B. HENDERSON¹²⁴¹.

1240 S. N.S. PARK / D. ROBERTSON / K. STENNING: An Extension of the Temporal Synchrony Solution to Dynamic Variable Bindings in a Connectionist System. Knowledge-Based Systems. Vol. 8. 1995. PP. 345-57.

1241 S. z.B. J. HENDERSON: Connectionist Syntactic Parsing Using Temporal Variable Binding. Journal of Psycholinguistic Research. Vol. 23. 1994. PP. 353-79.

5.1.06 INFERNET NACH J.P. SOUGNÉ

Ausgehend von dem sog. „Problem der multiplen Instantiierung“ (engl. “problem of multiple instantiation”)¹²⁴², das dadurch auftritt, wenn mindestens zwei Instantiierungen eines Prädikates mit verschiedenen (Objekt-)Argumentbindungen im Arbeitsgedächtnis vorliegen, m.a.W., wenn eine Rolle an verschiedene Füller gebunden werden muß, oder, wenn ein Füller an verschiedene Rollen gebunden werden muß¹²⁴³, entwickelte der belgische (Neuro-)Psychologe Jacques P. SOUGNÉ¹²⁴⁴ ein konnektionistisches Architekturmodell namens INFERNET¹²⁴⁵, wobei seine Lösung darin besteht, daß – auf der Basis des neuralen (Bindungs-)Prinzips der temporalen Synchronisation – die jeweiligen Konstellationen zwischen der Instantiierung eines Prädikates mit seinen Prädikatargumenten mit jeweils unterschiedlichen (synchronen) Oszillationsfrequenzen versehen sind, d.h. eine neu hinzutretende Instanz eines Prädikates wird anhand einer Periodenverdopplung (engl. “period doubling”)¹²⁴⁶ der Oszillationsfrequenz des betreffenden Neuronenverbandes realisiert.

Dies wird nun von J.P. SOUGNÉ¹²⁴⁷ an einem Beispiel erläutert (s. Graphik.40).

1242 Einführend s. z.B. J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 374-82, v.a. PP. 378-81.

Eingehend. s. z.B. J.P. SOUGNÉ: INFERNET: A Neurocomputational Model of Binding and Inference. Doctoral Thesis. Université de Liège. 1999. PP. 39-41, 109-53 – J.P. SOUGNÉ: Connectionism and the Problem of Multiple Instantiation. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. PP. 183-89, v.a. PP. 184-85 – J.P. SOUGNÉ: Binding and Multiple Instantiation in Distributed Networks of Spiking Nodes. Connection Science. Vol. 13. 2001. PP. 99-126, v.a. PP. 112-14.

1243 Vgl. hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213.

1244 Zur Person Jacques P. SOUGNÉ's siehe die Website <http://www2.fapse.ulg.ac.be/UDI/jsougne/-index.html>.

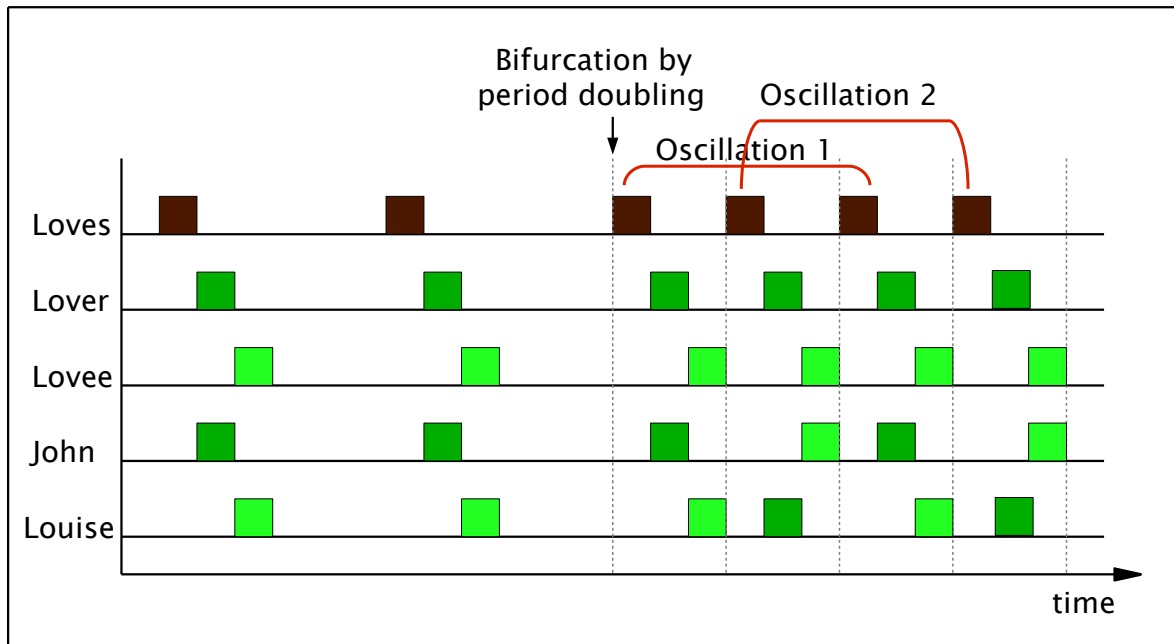
1245 Grundlegend s. z.B. J.P. SOUGNÉ: INFERNET: A Neurocomputational Model of Binding and Inference. Doctoral Thesis. Université de Liège. 1999. v.a. PP. 2, 25-44.

S. auch J.P. SOUGNÉ: Binding and Multiple Instantiation in Distributed Networks of Spiking Nodes. Connection Science. Vol. 13. 2001. PP. 101-14.

1246 S. z.B. J.P. SOUGNÉ: INFERNET: A Neurocomputational Model of Binding and Inference. Doctoral Thesis. Université de Liège. 1999. P. 117 – J.P. SOUGNÉ: Connectionism and the Problem of Multiple Instantiation. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. P. 187 – J.P. SOUGNÉ: Binding and Multiple Instantiation in Distributed Networks of Spiking Nodes. Connection Science. Vol. 13. 2001. PP. 113-14 – J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 380-81.

Experimentell belegt wird eine solche Periodenverdopplung z.B. bei S. ISHIZUKA / H. HAYASHI: Chaotic and Phase-Locked Responses of the Somatosensory Cortex to a Periodic Medial Lemniscus Stimulation in the Anesthetized Rat. Brain Research. Vol. 723. 1996. PP. 46-60.

1247 S. z.B. J.P. SOUGNÉ: INFERNET: A Neurocomputational Model of Binding and Inference. Doctoral Thesis. Université de Liège. 1999. P. 119 – J.P. SOUGNÉ: Connectionism and the Problem of Multiple Instantiation. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. PP. 185 – J.P. SOUGNÉ: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 380.



Graphik.40: Schematische Darstellung des Problems der multiplen Instantiierung anhand der Verwendung von multiplen Oszillationsfrequenzen mit einer Periodenverdopplung: Wenn der erste Sachverhalt 'John loves Louise' präsentiert wird, feuern die Neuronen mit einer bestimmten Frequenz, d.h. der Neuronenverband, der den Füller 'John' kodiert, feuert in Synchronizität mit dem Neuronenverband, der die Rolle 'Lover' kodiert (dunkelgrün), und der Neuronenverband, der den Füller 'Louise' kodiert, feuert in Synchronizität mit dem Neuronenverband, der die Rolle 'Lovee' kodiert (hellgrün). Wenn zusätzlich der zweite Sachverhalt 'Louise loves John' präsentiert wird, hat dies eine Bifurkation mit einer Periodenverdopplung zur Folge, sodaß eine zweite Oszillation hinzugefügt wird, d.h., der Neuronenverband, der den Füller 'Louise' kodiert, feuert nun in Synchronizität mit dem Neuronenverband, der die Rolle 'Lover' kodiert (dunkelgrün), und der Neuronenverband, der den Füller 'John' kodiert, feuert nun in Synchronizität mit dem Neuronenverband, der die Rolle 'Lovee' kodiert (hellgrün). Demzufolge stehen nach der Periodenverdopplung den Neuronenverbänden, die die Füller 'John' und 'Louise' sowie die Rollen 'Lover' und 'Lovee' kodieren, zwei Oszillationen zur Verfügung, damit die Füller 'John' und 'Louise' alternativ an die jeweiligen Rollen 'Lover' und 'Lovee' gebunden werden können (angelehnt an J.P. SOUGNÉ: Connectionism and the Problem of Multiple Instantiation. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. P. 187).

5.1.07 (COMBINATORIALLY ENDOWED) HEBBIAN-COMPETITIVE NETWORK NACH R.F. HADLEY

5.1.07.1 Mit Bezug auf seine Typologie von Graden der Systematizität¹²⁴⁸, die ein künstliches neuronales Netzwerk ausführen kann, entwirft der U.S.-amerikanische Informatiker und Philosoph Robert F. HADLEY¹²⁴⁹ in Zusammenarbeit mit M.B. HAYWARD ein sog. "(Combinatorial Endowed)¹²⁵⁰ Hebbian-Competitive Network"¹²⁵¹, das dem dritten Systematizitätsgrad i.S.v. "strong semantic systematicity"¹²⁵² genügt, d.h., das mit einem unüberwachten HEBB'-schen Lernverfahren mit einer sog. "Winner-Take-All (WTA)" (Wettbewerbs-)Charakteristik¹²⁵³ ausgestattete (Grund-)Modell kann – vor allem mit der kombinatorischen Funktion von sog. „Bindungsknoten“ (engl. "binding nodes")¹²⁵⁴ in Anlehnung an die sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. "tensor product representation")¹²⁵⁵ i.S. P. SMOLENSKY's – (auch) solche Worte verarbeiten, die – im Vergleich zu den Testsätzen während des Trainings des Netzwerks –

1248 S. z.B. R.F. HADLEY: Systematicity in Connectionist Language Learning. *Mind and Language*. Vol. 9. No. 3. 1994. PP. 247-72, v.a. PP. 250-52 – R.F. HADLEY: Systematicity Revisited: Reply to Christiansen and Chater and Niklasson and van Gelder. *Mind and Language*. Vol. 9. 1994. PP. 431-44.

S. hierzu z.B. auch R.F. HADLEY: On the Proper Treatment of Semantic Systematicity. *Minds and Machines*. Vol. 14. 2004. PP. 145-72.

Zum Thema der Systematizität (engl. "systematicity") und die daran anknüpfende Diskussion bzgl. einer Systematizitätstypologie nach R.F. HADLEY s. H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. Kap. 4.12, 5.5240 und 5.5241, S. 17, 66-68 m.w.Lit.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 6.424.

1249 Zur Person Robert F. HADLEY's siehe die Website <http://www.cs.sfu.ca/~hadley/>.

1250 S. z.B. St.L. FRANK / W.F.G. HASELAGER: Robust Semantic Systematicity and Distributed Representations in a Connectionist Model of Sentence Comprehension. In: R. SUN / N. MIYAKE (Eds.): *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Mahwah/ NJ. 2006. PP. 226-31, die i.B. auf das Modell von "combinatorially-endowed wiring" sprechen.

1251 Grundlegend s. z.B. R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Unsupervised Connectionist Learning. In: *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Pittsburgh, Pennsylvania. July, 1995. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1995. PP. 358-63, v.a. PP. 359-60, mit Abbildungen zur Architektur (P. 360) – R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning. *Minds and Machines*. Vol. 7. 1997. PP. 1-37, v.a. PP. 6-12, mit Abbildungen zur Architektur (PP. 8, 10, 11, 15, 23).

S. auch R.F. HADLEY: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? *Connection Science*. Vol. 19. 2007. PP. 1424-26, mit Abbildungen zur Architektur (P. 1425).

1252 S. z.B. R.F. HADLEY: Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1153.

S. im einzelnen hierzu z.B. H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 66, Fn. 328.

1253 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

1254 S. z.B. R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Unsupervised Connectionist Learning. In: *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Pittsburgh, Pennsylvania. July, 1995. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1995. PP. 358-63, v.a. P. 360.

1255 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.01.213.

in neuen syntaktischen Positionen auftreten, und ihnen auch angemessene Bedeutungen zuweisen.¹²⁵⁶

Das Grundmodell ist nun mehrfach weiterentwickelt worden, z.B. anhand eines sog. "Simple Recurrent Network" i.S. J.L. ELMAN's¹²⁵⁷ oder einer sog. "Self Organizing (Feature) Map (SOM)" i.S. T. KOHONEN's.¹²⁵⁸

5.1.07.2 Im Gegensatz zum LISA-Modell nach J.E. HUMMEL und K.J. HOLYO-AK¹²⁵⁹ und zum SHRUTI-Modell nach L. SHASTRI und V. AJJANAGADDE¹²⁶⁰ vertritt R.F. HADLEY¹²⁶¹ jedoch die Position, daß die (Variablen-)Bindung in syntaktischen (Symbol-)Strukturen (engl. "value-variable binding" oder "filler-role binding")¹²⁶² anhand der Synchronisationshypothese auf eine (Tiefenstruktur-)Bindung anhand der Operation von zusätzlich vorhandenen sog. „konjunktiven Bindungsknoten“ (engl. "Conjunctive Binding Nodes (CBN)")¹²⁶³ im Rahmen des sog. "conjunctive coding"¹²⁶⁴ zurückführbar sei.

1256 S. z.B. R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Unsupervised Connectionist Learning. In: Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Pittsburgh, Pennsylvania. July, 1995. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1995. PP. 358, 360, 363.

1257 S. z.B. R.F. HADLEY / D. ARNOLD / VI. CARDEI: Syntactic Systematicity Arising from Semantic Predictions in a Hebbian-Competitive Network. In: Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Madison, Wisconsin. August, 1998. Erlbaum. Mahwah /NJ. 1998. PP. 460-65, v.a. PP. 460-62, mit Abbildungen zur Architektur (P. 461) – R.F. HADLEY / A. ROTARU-VARGA / D. ARNOLD / VI. CARDEI: Syntactic Systematicity Arising from Semantic Predictions in a Hebbian-Competitive Network. Connection Science. Vol. 13. 2001. PP. 73-94, v.a. PP. 77-79, mit Abbildungen zur Architektur (P. 76).

Zum sog. "Simple Recurrent Network" i.S. J.L. ELMAN's siehe die Ausführungen in Kpt. 2.25.02.

1258 S. z.B. R.F. HADLEY / VI. CARDEI: Language Acquisition from Sparse Input without Error Feedback. Neural Networks. Vol. 12. 1999. PP. 217-35, v.a. PP. 219-24.

Zum sog. "Self-Organizing (Feature) Map (SOM)" i.S. T. KOHONEN's siehe die Ausführungen in Kap. 4.4.01.

1259 Siehe die Ausführungen in Kpt. 5.1.04.2.

1260 Siehe die Ausführungen in Kpt. 5.1.05.

1261 S. R.F. HADLEY: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? Connection Science. Vol. 19. 2007. PP. 1423-27, v.a. PP. 1425-27.

1262 S. R.F. HADLEY: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? Connection Science. Vol. 19. 2007. P. 1424.

1263 S. R.F. HADLEY: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? Connection Science. Vol. 19. 2007. P. 1424.

1264 S. R.F. HADLEY: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? Connection Science. Vol. 19. 2007. PP. 1423-24: "(...) conjunctive coding, where the binding of two elements is signaled by the cyclical firing of a particular node (realized by one or more neurons) that receives input from other nodes that represent the elements which are to be bound together (or 'conjoined').

(...)

The few causal indications that do exist are compatible with the following supposition: apart from spurious coincidences, neurons fire in synchrony only when they are each connected to explicit conjunctive binding nodes (dub them CBN) whose cyclical firing engenders synchrony in the firing cycles of neurons that the CBNs are immediately connected to. The simplest form of this supposition would require one conjunctive binding node for each pair of synchronously firing nodes."

5.1.08 (HYBRID) CONSYDERR ARCHITECTURE NACH R. SUN

Eine sog. „hybride Architektur“ (engl. “hybrid architecture”)¹²⁶⁵, d.h. ein aus konnektionistischen und symbolischen Modulen bestehendes Modell, hat der U.S.-amerikanische Informatiker und Kognitionswissenschaftler Ron SUN¹²⁶⁶ mit seiner sog. “CONSYDERR¹²⁶⁷ Architecture”¹²⁶⁸, einer sog. “Fully Integrated (Hybrid) Architecture”¹²⁶⁹, die sich dadurch auszeichnet, daß die dynamische Variablenbindung¹²⁷⁰ anhand einer Verarbeitung von Zeichen durchgeführt wird (sog. “sign propagation”)¹²⁷¹, basierend auf dem sog. “Dis-

1265 Einen einführenden Überblick hierzu bietet z.B. R. SUN: An Introduction: On Symbolic Processing in Neural Networks. In: R. SUN / L.A. BOOKMAN (Eds.): Computational Architectures Integrating Symbolic and Connectionist Processing. A Perspective on the State of the Art. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1995. PP. 1-18 – R. SUN: An Introduction to Hybrid Connectionist-Symbolic Models. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 1-10 – St. WERMTER / R. SUN: An Overview of Hybrid Neural Systems. In: St. WERMTER / R. SUN (Eds.): Hybrid Neural Systems. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 1-13 – R. SUN: Artificial Intelligence. Connectionist and Symbolic Approaches. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Pergamon/Elsevier Science. Oxford. 2001. PP. 783-89.

S. auch R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997.

1266 Zur Person Ron SUN's siehe die Website <http://www.cogsci.rpi.edu/~rsun/>.

1267 Der Ausdruck CONSYDERR steht dabei für “CONnectionist System with Dual representation for Evidential Robust Reasoning”.

S. z.B. R. SUN: Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning. John Wiley & Sons. New York. 1995. P. 48.

1268 Grundlegend s. z.B. R. SUN: CONSYDERR: A Two-Level Hybrid Architecture for Structuring Knowledge for Commonsense Reasoning. In: R. SUN / L.A. BOOKMAN (Eds.): Computational Architectures Integrating Symbolic and Connectionist Processing. A Perspective on the State of the Art. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1995. PP. 247-81.

S. auch R. SUN: Schemas, Logic and Neural Assemblies. Applied Intelligence. Vol. 5. 1995. PP. 83-102 – R. SUN: Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning. John Wiley & Sons. New York. 1995. PP. 39-73 – R. SUN: Robust Reasoning: Integrating Rule-Based and Similarity-Based Reasoning. Artificial Intelligence. Vol. 75. 1995. PP. 241-96.

Einführend s. z.B. R. SUN: On Variable Binding in Connectionist Networks. Connection Science. Vol. 4. 1992. PP. 93-124, v.a. PP. 95-100.

1269 S. hierzu z.B. St. WERMTER / R. SUN: An Overview of Hybrid Neural Systems. In: St. WERMTER / R. SUN (Eds.): Hybrid Neural Systems. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. P. 5: “In fully integrated and interleaved systems, the constituent modules interact through multiple channels (e.g., various possible function calls), or may even have node-to-node connections across two modules, such as CONSYDERR (...) in which each node in one module is connected to a corresponding node in the other module.”

1270 S. z.B. A. BROWNE / R. SUN: Connectionist Variable Binding. Expert Systems. Vol. 16. 1999. PP. 189-207, v.a. PP. 191-99 – R. SUN: On Variable Binding in Connectionist Networks. Connection Science. Vol. 4. 1992. PP. 93-124, v.a. PP. 95-103 – R. SUN: Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning. John Wiley & Sons. New York. 1995. PP. 194-96 – R. SUN: A Discrete Neural Network Model for Conceptual Representation and Reasoning. Proceedings of the 11th Conference of the Cognitive Science Society, 1989. PP. 916-23.

1271 S. z.B. A. BROWNE / R. SUN: Connectionist Variable Binding. Expert Systems. Vol. 16. 1999. P. 191: “One way of performing variable binding is to use sign propagation (sometimes referred to as signature propagation). The basic idea of sign propagation (...) is very simple: a separate node is allocated for each variable associated with each concept. For example, in first-order predicate logic, each argument of a predicate is allocated a node as its representation; a

crete Neuronal Model (DN model)"¹²⁷².

value is allocated to represent each particular object (i.e., a constant in first-order logic) and thus is a sign of the object which it represents. A node may take on an activation value as a sign in the same way as in conventional connectionist models. This activation value represents a particular object and is merely a pointer. This sign can be propagated from one node to other nodes when the same object which the sign represents is being bound to other variables from an application of a rule."

1272 Grundlegend s. R. SUN: A Discrete Neural Network Model for Conceptual Representation and Reasoning. Proceedings of the 11th Conference of the Cognitive Science Society, 1989. PP. 916-23.

5.1.09 NEURAL BLACKBOARD ARCHITECTURES NACH Fr. VAN DER VELDE UND M. DE KAMPS

5.1.09.1 Eine direkte neurale Implementation eines klassischen Symbolsystems mit einem lokalen Repräsentationsformat haben der holländische Physiker, Psychologe und Philosoph Frank van der VELDE¹²⁷³ und der holländische Physiker und Neuroinformatiker Marc de KAMPS¹²⁷⁴ mit ihren sog. "Neural Blackboard Architectures (NBAs)"¹²⁷⁵, im weiteren als „NBAs-Architektur“ bezeichnet, vorgenommen, eine neurale Architektur, die den vier Herausforderungen für die kognitive Neurowissenschaft zu begegnen versucht, beschrieben durch R. JACKENDOFF (sog. "JACKENDOFF's Challenges")¹²⁷⁶, u.z., vor allem, die Bindung eines Argumentes an eine thematische Rolle eines Verbs neural derart zu implementieren, daß eine systematische und kompositionale mentale Repräsentation erzeugt wird (sog. "variable binding")¹²⁷⁷.

5.1.09.2 Die NBAs-Architektur besteht im Grunde aus dem Kodierungskonzept der sog. „neuronalen Assemblies“ (engl. "neuronal assemblies") – in

1273 Zur Person Frank van der VELDE's siehe die Website <http://www.fsw.leidenuniv.nl/psychologie/organisatie/cognitievepsychologie/medewerkers/medewerkers/velde.html>.

1274 Zur Person Marc de KAMPS' siehe die Website <http://www.comp.leeds.ac.uk/dekamps/>.

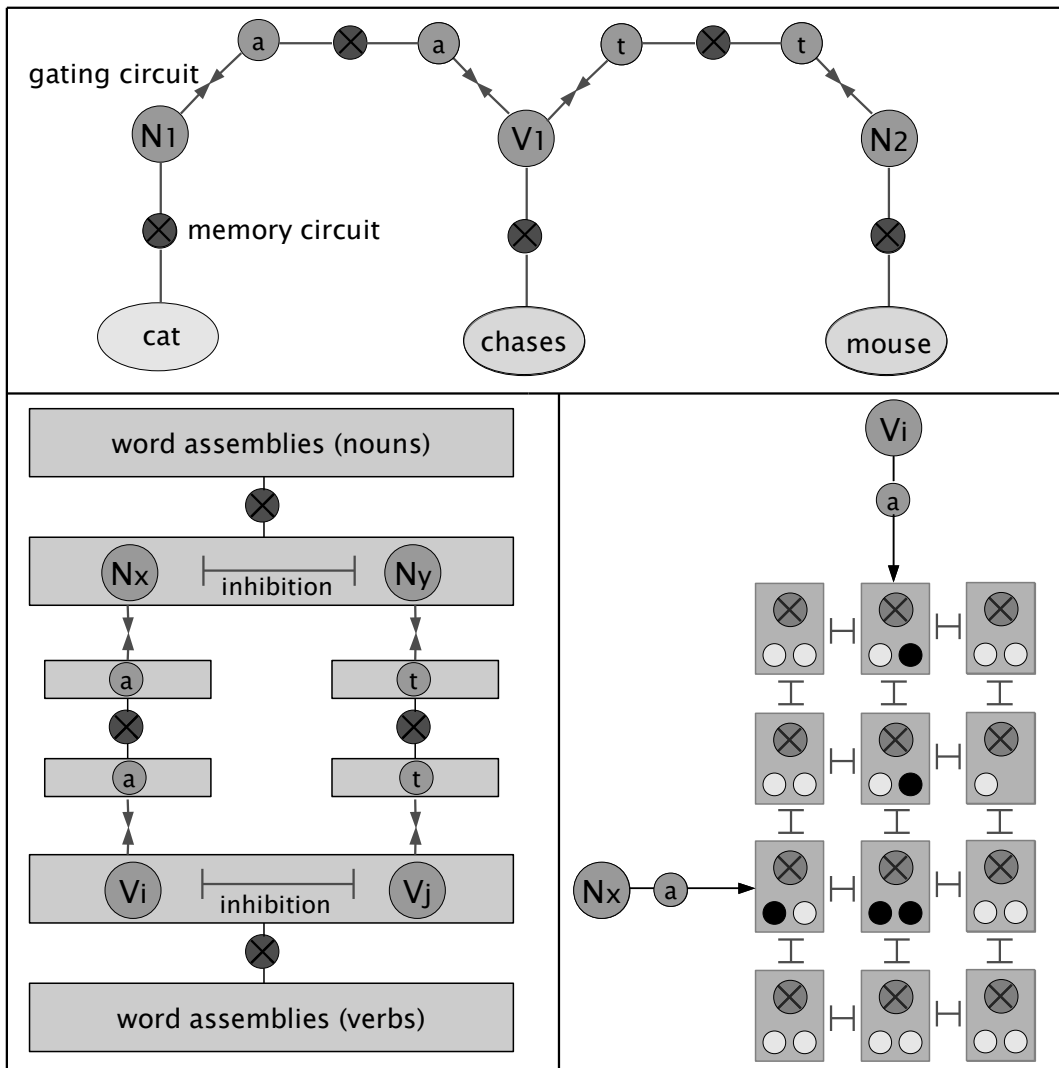
1275 S. hierzu grundlegend Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 37-70, v.a. PP. 43-61 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 88-108 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: A Neural Blackboard Architecture of Sentence Structure. Technical Report. Unpublished. 2003. PP. 1-40.

S. einführend hierzu z.B. Fr. van der VELDE: Neural Architectures of Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 265-81, v.a. PP. 268-73 – M. de KAMPS / Fr. van der VELDE: Neural Blackboard Architectures: The Realization of Compositionality and Systematicity in Neural Networks. Journal of Neural Engineering. Vol. 3. 2006. PP. 1-12 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 602-604.

Kritisch dazu s. z.B. L.A.A. DOUMAS / K.J. HOLYOAK / J.E. HUMMEL: The Problem with Using Associations to Carry Binding Information. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 74-75 – R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 78-79 – R.F. HADLEY: Neural Circuits, Matrices, and Conjunctive Binding. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 80 – L. SHASTRI: Comparing the Neural Blackboard and the Temporal Synchrony-Based SHRUTI Architectures. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 84-86 – T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 603-604.

1276 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1, v.a. Fn. 1040.

1277 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1, 5.1.01.213.



Graphik.41: Schematisches Diagramm der sog. "Neural Blackboard Architecture (NBA)" für eine Verb/Argument-Bindung (engl. "verb-argument binding"), illustriert anhand der neuronalen Satzstruktur 'The cat chases the mouse', wobei die Struktur aus den sog. "word assemblies" für 'cat', 'mouse' und 'chases' und den sog. "structure assemblies" für die sog. "noun phrase (NP) assemblies" (N_1 , N_2 , bzw. N_x , N_y) und für die sog. "verb phrase (VP) assemblies" (V_1 , bzw. V_i , V_j) besteht, zusammen mit einer Anzahl von sog. "subassemblies" (a , t), die über sog. "gating circuits" mit den sog. "main assemblies" verbunden sind, und die thematischen Rollen, wie z.B. einen Agenten (a) oder ein Thema (t) repräsentieren. Eine Bindung zwischen Assemblies wird über aktive sog. "memory circuits" erreicht, z.B. wird hier das Assembly für 'cat' an das "NP assembly" ' N_1 ' gebunden usw., und das "NP assembly" ' N_1 ' und das "(VP) assemblies" ' V_1 ' anhand ihrer sog. "agent subassemblies", und ' V_1 ' und ' N_2 ' anhand ihrer sog. "theme subassemblies" gebunden (oberes und linkes unteres Graphiksegment). Dabei besteht die Konnektionsstruktur zwischen den "agent subassemblies" aus einem Matrix-ähnlichen Gitter von Spalten, wobei jedes "agent subassembly" von allen "NP assemblies" verbunden ist mit jedem "agent subassembly" von allen "VP assemblies". Sofern also die "agent subassemblies" N_x und V_i simultan aktiv sind, resultiert dies in einer Bindung zwischen diesen "agent subassemblies", z.B. zwischen N_1 und V_1 im Beispiel (in Anlehnung an Fr. van der VELDE / M. DE KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 44, 45, Fig. 2 (41.2), 4 (41.1), 5 (41.3)).

Anlehnung an den (Neuro-)Biologen, Linguisten, Psychologen und Neurowissenschaftler Friedemann PULVERMÜLLER¹²⁷⁸, die temporär gebunden werden können an einzelne atomare Konstituenten und ihren grammatischen Relationen im Rahmen einer kombinatorischen (Sprach-)Struktur (engl. "combinatorial structure")¹²⁷⁹ (s. Graphik.41.1,2,3): Ausgehend von zwei Arten von Assemblies, (1) den sog. "content assemblies"¹²⁸⁰ bzw. "'word' assemblies"¹²⁸¹, die z.B. Substantive in Form von sog. "noun assemblies" und Verben in Form von sog. "verb assemblies" usw. repräsentieren, und (2) den sog. "structure assemblies", die ein Element einer syntaktischen Struktur repräsentieren, z.B. eine Nominalphrase (engl. "noun phrase (NP)") in Form von sog. "NP main assemblies", oder eine Verbalphrase (engl. "verb phrase (VP)") in Form von sog. "VP main assemblies" mit den entsprechenden sog. "subassemblies" für thematische Rollen, wie z.B. Agent (engl. "agent"), Thema (engl. "theme") und Rezipient (engl. "recipient") (s. Graphik.41.1), wird nun eine zeitliche Bindung eines Arguments, d.h. eines Nominalphrasenassemblies (engl. "NP assembly"), an eine thematische Rolle eines Verbs, d.h. eines Verbalphrasenassemblies (engl. "VP assembly"), vorgenommen, indem die entsprechenden, der Art nach gleichen Subassemblies des Nominal- und Verbalphrasenassemblies über bestimmte (Aktivierungs-)Kontrollprozesse im Rahmen von sog. "memory circuits"¹²⁸² (s. Graphik.41.3) und sog. "gating cir-

1278 S. Fr. PULVERMÜLLER: Word's in the Brain's Language. Behavioral and Brain Science. Vol. 22. 1999. PP. 253-70, v.a. PP. 258-63, 263-67, 267-272, 272-74, v.a. P. 255: "If neurons in an associative network exhibit correlated activity, they will be a stronger influence on each other. This implies that these neurons will be more likely to act together as a group. Hebb (...) calls such anatomically and functionally connected neuron groups 'cell assemblies.' The strong within-assembly connections are likely to have two important functional consequences: (1) If a sufficiently large number of the assembly neurons are stimulated by external input (either through sensory fibers or through cortico-cortical fibers), activity will spread to additional assembly members and, finally, the entire assembly will be active. This explosion-like process has been called ignition of the assembly (...). (2) After an assembly has ignited, activity will not stop immediately (because of fatigue or regulation processes), but the strong connections within the assembly will allow activity for some time. Cell assemblies are sometimes conceptualized as packs of neurons without an ordered inner structure. However, according to Hebb's (...) proposal, assembly neurons are connected so that ordered spreading and reverberation of neuronal activity can occur."

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.4.

1279 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 43: "To address Jackendoff's (...) problems, neural word assemblies are not copied in this architecture. Instead, they are temporarily bound to the neural blackboard in a manner that distinguishes between different occurrences of the same word and that preserves the relations between the words in the sentence."

1280 S. Fr. van der VELDE: Neural Architectures of Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 268.

1281 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 44.

1282 S. hierzu im einzelnen Fr. van der VELDE: Neural Architectures of Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 270-71 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 45: "A memory circuit consists of a gating circuit in which the control signal results from a 'delay' assembly."

cuits"¹²⁸³ einer simultanen (Ko-)Aktivierung unterliegen.¹²⁸⁴ Z.B., um eine Satzstruktur im Langzeitgedächtnis, implementiert im sog. „hippocampalen Komplex“ (engl. “Hippocampal Complex (HC)”) ¹²⁸⁵, wie *John loves* zu repräsentieren, wird das Substantiv *John* aus einer feststehenden Anzahl von “NP main assemblies” an eines davon gebunden, das Verb *loves* wird entsprechend ebenfalls an ein bestimmtes “VP main assembly” gebunden, und danach werden diese über ihre gleichen “agent subassemblies” aneinander

(...)

“A memory circuit has two possible states: active and inactive. (...) If the memory circuit is inactive, activation cannot flow between the assemblies the circuit connects. If the memory circuit is active, activation will flow between the assemblies the circuit connects if one of these assemblies is active. In this way, an active memory circuit binds the two assemblies it connects. This binding lasts as long as the activation of the delay assembly in the memory circuit.”

1283 S. hierzu im einzelnen Fr. van der VELDE: *Neural Architectures of Compositionality*. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): *The Compositionality of Meaning and Content*. Vol. I: *Foundational Issues*. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 270-71 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: *Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 45, 46: “A gating circuit consists of a disinhibition circuit. (...) The circuit controls the flow of activation by means of an external control signal.”

(...)

[There is a] “connection structure between the agent subassemblies (...) consists of a matrix-like array of ‘columns.’ Each column contains a memory circuit (in both directions) and the delay assembly that can activate the memory circuit. Each column also contains a circuit to activate the delay assembly (...). This circuit is a disinhibition circuit that activates the delay assembly if the neurons (...) are active at the same time. These neurons are activated by the respective agent subassemblies of an NP assembly and a VP assembly.”

1284 S. hierzu im einzelnen Fr. van der VELDE: *Neural Architectures of Compositionality*. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): *The Compositionality of Meaning and Content*. Vol. I: *Foundational Issues*. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 271-73 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: *Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 45-46: “Each noun (word) assembly is connected to the main assembly of each NP assembly with a memory circuit (initially inactive). Likewise, each verb (word) assembly is connected to the main assembly of each VP assembly with a memory circuit (initially inactive). Main assemblies of the same kind are mutually inhibitory. Each NP and VP main assembly is connected to a number of subassemblies with gating circuits. The gating circuits can be selectively activated by neural control circuits (...). For example, the gating circuits between the main assemblies and the agent subassemblies can be activated without activating the gating circuits for the theme subassemblies. Finally, all subassemblies of the same kind are connected through memory circuits. For example, each agent subassembly of the NP assemblies is connected to each agent subassembly of the VP assemblies with a memory circuit (initially inactive).

A new NP assembly will be activated when a new noun in a sentence is processed. The NP assembly is arbitrary but “free,” that is, not already bound to a sentence structure (i.e., all its memory circuits are inactive). The active NP assembly will remain active until a new NP assembly is activated by the occurrence of a new noun in the sentence. The selection of a VP assembly is similar.

When several structure assemblies have been activated, the ones activated first will return to the inactive state because of the decay of delay activity in their memory circuits. In this way, only a subset of the structure assemblies will be concurrently active and ‘free’ structure assemblies will always be available. As a result, a limited set of VP assemblies and NP assemblies is needed in this architecture.”

1285 S. im einzelnen Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: *Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 51-53.

gebunden (s. Graphik.41.2).¹²⁸⁶

¹²⁸⁶ S. hierzu im einzelnen Fr. van der VELDE: Neural Architectures of Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 268-73, v.a. P. 269.

Ein weiteres ausführlicheres Beispiel ist zu finden in Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 44-45, 53-54.

Ein Beispiel zur Lösung des Problems der mehrfachen Instantiierung (engl. "multiple instantiation"), von R. JACKENDOFF als "problem of 2" bezeichnet, findet sich in Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 47-49.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.442.

S. hierzu auch Fn. 1276.

5.1.10 DYNAMIC LINK ARCHITECTURE NACH CHR. VON DER MALSBURG

Eine Weiterentwicklung seiner sog. „(Signal-)Korrelationstheorie der Hirnfunktion“ (engl. “correlation theory of brain function”)¹²⁸⁷ hat der Physiker Christoph von der MALSBURG¹²⁸⁸ mit der sog. “Dynamic Link Architecture (DLA)”¹²⁸⁹ vorgenommen, einem abstrakten (mathematischen) Modelltyp¹²⁹⁰, der das Bindungsproblem im Gegensatz zu den sog. „klassischen neuronalen Netzwerken“ (engl. “classical neural networks”)¹²⁹¹ in Gestalt z.B. des sog. “feature bindings”¹²⁹² dadurch zu lösen versucht, daß auf Grund von stochastischen Konvergenzprozessen in kurzen Zeitspannen flexible dynamische neuronale Verbindungen zur Erhöhung der temporären Verbindungsstärke (engl. “temporary weight”)¹²⁹³ hergestellt werden (engl. “Rapid Reversible Synaptic Plasticity (RRP)”)¹²⁹⁴, sodaß nicht nur die Signalintensität i.S. der Erhö-

1287 Siehe hierzu im die Ausführungen in Kap. 3.31, Fn. 12.

1288 Zur Person Christoph von der MALSBURG's siehe die Website <http://fias.uni-frankfurt.de/~malsburg/>.

1289 Grundlegend s. z.B. Chr. von der MALSBURG: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Department of Neurobiology, Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry, Göttingen. 1981. PP. 1-26 – Chr. von der MALSBURG: Nervous Structures with Dynamical Links. Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie. Vol. 89. 1985. PP. 703-10 – Chr. von der MALSBURG: Am I Thinking Assemblies? In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): Brain Theory. Springer-Verlag, Berlin. 1986. PP. 161-76.

Eingehend s. z.B. Chr. von der MALSBURG / W. SCHNEIDER: A Neural Cocktail-Party Processor. Biological Cybernetics. Vol. 54. 1986. PP. 29-40 – Chr. von der MALSBURG / E. BIENENSTOCK: A Neural Network for the Retrieval of Superimposed Connection Patterns. Europhysics Letters. Vol. 3. 1987. PP. 1243-49 – E. BIENENSTOCK / Chr. von der MALSBURG: A Neural Network for Invariant Pattern Recognition. Europhysics Letters. Vol. 4. 1987. PP. 121-26 – L. WISKOTT / Chr. von der MALSBURG: Face Recognition by Dynamic Link Matching. In: J. SIROSH / R. MIKKULAINEN / Y. CHOE (Eds.): Lateral Interactions in the Cortex: Structure and Function. 1996 – J. ZHU / Chr. von der MALSBURG: Synapto-Synaptic Interactions Speed Up Dynamic Link Matching. Neurocomputing. Vol. 44. 2002. PP. 721-28.

Einführend s. z.B. Chr. von der MALSBURG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 329-31 – Chr. von der MALSBURG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 365-68 – Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 101-103 – Chr. von der MALSBURG: The Binding Problem of Neural Networks. In: R.R. LLINÁS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 131-46.

1290 Nach Chr. von der MALSBURG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 365 liegt noch keine kanonische mathematische Form vor, weshalb eine Vielzahl von Modellvarianten darunter subsumiert werden kann, z.B. HOPFIELD-Architekturen.

1291 S. z.B. Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 95, 97-98.

1292 Siehe hierzu im die Ausführungen in Kap. 3.30, Fn. 542.

1293 S. z.B. Chr. von der MALSBURG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 365.

1294 S. z.B. Chr. von der MALSBURG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 366.

hung der Feuerrate bezogen auf ein bestimmtes Zeitintervall für eine (Eigenschafts-)Bindung entscheidend ist, sondern eben die Erhöhung der temporalen Signalkorrelationen i.S. einer synchronen neuronalen Aktivität, wodurch die entsprechenden dynamischen Verbindungen (engl. "dynamical links") im Rahmen von konvergent-kompetitiven Selbstorganisationsprozessen¹²⁹⁵ ihre maximale Verbindungsstärke erreichen (engl. "Dynamic Link Matching (DLM)")¹²⁹⁶, was erst eine dauerhafte Veränderung der Synapsengewichte zur Folge hat (engl. "permanent weight").¹²⁹⁷

1295 S. z.B. Chr. von der MALSBERG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 365, 366: "Under the influence of signal exchange, graphs and their units and links are subject to dynamic change, constituting a game of network self-organization (...). The dynamic links have a resting strenght near the value of the permanent weight."
(...)

"Links are subject to divergent and convergent competition: links converging on one unit compete with each other for strenght, as do links diverging from one unit. This competition drives graphs to sparsity. Links are also subject to cooperation. Several links carrying correlated signal structure cooperate in imposing that signal structure on a common target unit, helping them all to grow. Because the ultimate cause for all signal structure is random, correlations can only be generated on the basis of common origin of pathways. Thus, cooperation runs between pathways that start at one point and converge to another point. The common origin of converging pathways may, of course, be an event or a pattern in the environment."

1296 S. z.B. J. ZHU / Chr. von der MALSBERG: Synapto-Synaptic Interactions Speed Up Dynamic Link Matching. Neurocomputing. Vol. 44. 2002. P. 2 – Chr. von der MALSBERG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 102-103.

1297 S. z.B. Chr. von der MALSBERG: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 366: "In classical neural architectures, learning is modeled by *synaptic plasticity*, or the change of permanent synaptic weights under the control of neural signals. This general idea is also part of the dynamic link architecture. However, DLA imposes a further refinement in that a permanent weight grows only when the corresponding dynamic link has converged to its maximum strenght, which happens only in the context of an organized graph structure. For a permanent link to grow, it is thus not sufficient for the two connected units to have high intensity in the same brain state; in addition, their signals must be correlated and their link must be active."

5.2 SYSTEMATISCHE KLASSE DER ATTRAKTOR-BASIERTEN ARCHITEKTURTYPEN

Die systematische Klasse der Attraktor-basierten Architekturtypen, basierend auf der mathematischen Konzeption eines sog. „Attraktors“ (engl. „attractor“)¹²⁹⁸ im Rahmen der (nichtlinearen) Theorie der dynamischen Systeme, umfaßt diejenigen konnektionistischen Modelle (Kap. 5.2.01-5.2.07), die diese dynamische Konzeption auf das Problem der Analyse und Repräsentation von (neuro-)kognitiven Konzepten i.w.S.¹²⁹⁹ anzuwenden versuchen, wobei es sowohl bei der Repräsentation von Perzepten im Rahmen der Wahrnehmungskognition (sog. „low-level cognition“) eingesetzt wird (Kap. 5.2.01), als auch in der Sprachverarbeitungskognition (sog. „high-level cognition“), z.B. bei dem Problem der syntaktischen Konstituenz (engl. „syntactic constituency“) (Kap. 5.2.02), bei dem Problem der Kompositionalität (engl. „compositionality“) (Kap. 5.2.03)¹³⁰⁰ und vor allem bei der Repräsentation von kontextsensitiven semantischen Konzepten (Kap. 5.2.04-5.2.07).

1298 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.222, 1.232.

1299 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.20.

1300 Das „Synfire Chain (SFC) Model“ M. ABELES' könnte dabei systematisch auch unter die Klassifikation der sog. „spiking neural networks“ (Kap. 5.4) subsumiert werden.

5.2.01 K0-KV SET ATTRACTOR NETWORK MODELS NACH W.J. FREEMAN¹³⁰¹

5.2.01.1 Anhand von Befunden aus der Neurophysiologie, v.a. am Riechhirn des Kaninchens¹³⁰², rekonstruiert der U.S.-amerikanische Neurobiologe und Philosoph Walter J. FREEMAN¹³⁰³ mit seinen sog. "K0-KV (KATCHALSKY) Set Attractor Network Models"¹³⁰⁴ das olfaktorische System als ein nichtlineares dynamisches System i.S. der Chaostheorie¹³⁰⁵: Ausgehend von einer Analyse der EEG-Aktivität in Form eines 3-dimensionalen Profils der Amplitudenmodulation (engl. "amplitude modulation") der betreffenden Trägerwelle (engl. "carrier wave") des untersuchten Gehirnabschnitts¹³⁰⁶, z.B. des Riechkolbens

1301 Der Gedankengang des Kapitels orientiert sich im wesentlichen an L. HUBER: Wie das Neue in die Gehirne kommt. Emergenz und Chaos in neuronalen Prozessen. In: L. HUBER (Hrsg.): Wie das Neue in die Welt kommt. Phasenübergänge in Natur und Kultur. WUV, Wien, 2000, S. 159-66

1302 Grundlegend hierzu s. z.B. C.A. SKARDA / W.J. FREEMAN: How Brains Make Chaos in Order to Make Sense of the World. Behavioral and Brain Sciences, Vol. 10, 1987, PP. 161-95.

1303 Zur Person Walter J. FREEMAN's siehe die Website http://mcb.berkeley.edu/index.php?option=com_mcbfaculty&name=freemanw.

1304 Grundlegend s. Y. YAO / W.J. FREEMAN: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks, Vol. 3, No. 2, 1990, PP. 153-70 – W.J. FREEMAN: Simulation of Chaotic EEG Patterns with a Dynamic Model of the Olfactory System. Biological Cybernetics, Vol. 56, 1987, PP. 139-50.

Eingehend hierzu s. W.J. FREEMAN: Societies of Brains. A Study in the Neuroscience of Love and Hate. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale/NJ, 1995 – W.J. FREEMAN: How Brains Make up their Minds. Columbia University Press, New York, 2000 – W.J. FREEMAN (Ed.): Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics. Springer-Verlag, London/UK, 2000.

Einführend hierzu s. z.B. V.G. HARDCASTLE: The Binding Problem. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher, Malden/MA, Oxford/UK, 1998, P. 564 – W.T. ROCKWELL: Attractor Spaces as Modules: A Semi-Eliminative Reduction of Symbolic AI to Dynamic Systems Theory. Minds and Machines, Vol. 15, 2005, PP. 23-55, v.a. PP. 37-39 – A. SCHIERWAGEN: Modelle der Neuroinformatik als Mittler zwischen neurowissenschaftlichen Fakten und Kognitionstheorien. In: J.F. MAAS: Das sichtbare Denken. Modelle und Modellhaftigkeit in der Philosophie und den Wissenschaften. Editions Rodopi B.V. Amsterdam, Atlanta/GA, 1993, S. 131-52, v.a. S. 151-52 – H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft, Bd. 5, 1996, S. 160 – L. HUBER: Wie das Neue in die Gehirne kommt. Emergenz und Chaos in neuronalen Prozessen. In: L. HUBER (Hrsg.): Wie das Neue in die Welt kommt. Phasenübergänge in Natur und Kultur. WUV, Wien, 2000, S. 159-66 – C. KOLO / Th. CHRISTALLER / E. PÖPPEL: Bioinformation. Problemlösungen für die Wissensgesellschaft. Physica-Verlag, Heidelberg, 1999, S. 72.

1305 S. z.B. Y. YAO / W.J. FREEMAN: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks, Vol. 3, No. 2, 1990, P. 154 – C.A. SKARDA / W.J. FREEMAN: How Brains Make Chaos in Order to Make Sense of the World. Behavioral and Brain Sciences, Vol. 10, 1987, PP. 161-95, v.a. PP. 165-68, 171-72, 173, 189-92.

1306 Eingehend s. z.B. W.J. FREEMAN / W. SCHNEIDER: Changes in Spatial Patterns of Rabbit EEG with Conditioning to Odors. Psychophysiology, Vol. 19, 1982, PP. 44-56, v.a. PP. 47-52 – W.J. FREEMAN: Spatial Properties of an EEG Event in the Olfactory Bulb and Cortex. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Vol. 44, 1978, PP. 586-605 (reprinted in: W.J. FREEMAN (Ed.): Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics. Springer-Verlag, London/UK, 2000, PP. 211-39) – W.J. FREEMAN / G. VIANA DI PRISCO: EEG Spatial Pattern Differences with Discriminated Odors Manifest Chaotic and Limit Cycle Attractors in Olfactory Bulb of Rabbits. In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): Brain Theory. Springer-Verlag, Berlin, 1986, PP. 97-119 (reprinted in: W.J. FREEMAN (Ed.): Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics. Springer-Verlag, London/UK, 2000, PP. 265-90).

Einführend s. z.B. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Pro-

(engl. "olfactory bulb"), wird ein 64-dimensionaler (Attraktor-)Phasenraum (engl. "attractor phase space")¹³⁰⁷ konstruiert, der von einem einzigen globalen chaotischen Attraktor (engl. "global chaotic attractor")¹³⁰⁸ dominiert wird, bestehend aus einer Vielzahl von „(Attraktor-)Flügeln“ (engl. "(attractor) wings"), die eine sog. „Attraktorlandschaft“ (engl. "attractor landscape") aufspannen und für das Verhalten des Systems unter dem Einfluß eines bestimmten Eingangsreizes stehen, und von den dazugehörigen neuronalen Assemblies erzeugt werden, die sich bereits im Rahmen von schon stattgefundenen (Wahrnehmungs-)Erfahrungen – mit Bezug auf einen bestimmten Geruchsreiz – zu einem Verband zusammengeschlossen haben. Sofern sich nun das olfaktorische System im Grund- oder Ruhezustand befindet, besitzt es ein bevorzugtes Amplitudenmodulationsprofil¹³⁰⁹, das von einem bestimmten Attraktorflügel mit einem entsprechenden Attraktorbassin bestimmt wird. Bei einer (neuen) Reizvorgabe im Rahmen eines Wahrnehmungsvorgangs „springt“ oder „driftet“ nun das olfaktorische System plötzlich von einem Bassin eines Attraktorflügels in den eines anderen, abhängig von den Anfangsbedingungen, was einer sprunghaften (System-)Zustandsänderung entspricht, derart, daß damit ein lokales neuronales topographisches (Repräsentations-)Schema dynamisch konstruiert wird, das eine Klasse von bestimmten während des Trainings eingegangenen (neuen) Reizen ko-

cessing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 257-60 – K. McGOVERN / B.J. BAARS: Cognitive Theories of Consciousness. In: Ph.D. TELAZO / M. MOSCOVITCH / E. THOMPSON (Eds.): The Cambridge Handbook of Consciousness. Chapt. 26. Cambridge University Press. Cambridge. 2007. PP. 177-205.

Der experimentelle Versuchsaufbau besteht dabei darin, bis zu 64 Elektroden über einen großen Bereich des Riechkolbens des Kaninchens anzubringen, sodaß eine gemeinsame Aufzeichnung der EEG-Kurven von sehr großen Verbänden von Neuronen im Bereich von mehreren Hunderten von Neuronen vorgenommen werden kann, während es einen bestimmten Duft wahrnimmt.

Nach der Darbietung eines Duftreizes beobachtet man nun ein einheitliches raumzeitliches Aktivitätsmuster des gesamten Riechkolbens, wobei für eine kurze Zeitspanne synchrone Oszillationen im Frequenzbereich um 40 Hz auftreten. Die anschließende Computeranalyse der Daten, die in einem 64-dimensionalen Graphen dargestellt wird – entsprechend der Anzahl der Elektroden, wobei jeweils die Aktivität einer Elektrode einer Dimension des Graphen entspricht, zeigt das statistische Frequenzprofil der synchronen Oszillationen in der EEG-Aktivität eine für eine bestimmte Duftwahrnehmung charakteristische gemeinsame Wellenform, die sog. „Trägerwelle“ (engl. "carrier wave"), die sich nur in Bezug auf die an der jeweiligen Elektrode gemessene Amplitude unterscheidet. Daraufhin konstruiert man ein statistisches Profil der Amplitudenmodulation der Trägerwelle i.S. eines Konturdiagramms mit Höhenschichtlinien, indem man die (mittleren) Amplituden der EEG-Kurven in der dritten Dimension aufträgt – mit Bezug auf einen bestimmten untersuchten Gehirnabschnitt des Riechkolbens, sodaß man ein räumliches Höhenlinienmuster der enthaltenen Trägerwelle mit „Bergen“ und „Tälern“ erhält.

Einführend s. z.B. W.J. FREEMAN: How Brains Make up their Minds. Columbia University Press. New York. 2000. PP. 71-80 – L. HUBER: Wie das Neue in die Gehirne kommt. Emergenz und Chaos in neuronalen Prozessen. In: L. HUBER (Hrsg.): Wie das Neue in die Welt kommt. Phasenübergänge in Natur und Kultur. WUV. Wien. 2000. S. 160-62.

1307 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.221 und 1.222.

1308 S. z.B. Y. YAO / W.J. FREEMAN: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks. Vol. 3. No. 2. 1990. PP. 164, 165, 167, 169.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.221, 1.222 und 1.23.

1309 S. hierzu Fn. 1305.

dient¹³¹⁰. Das Erlernen eines bestimmten Geruchsreizes besteht somit in der stochastischen Tendenz, die durch den Lernvorgang selbst erzeugt wird, sich in einem bestimmten Attraktor(-flügel) bzw. in einer bestimmten, dem Phasenraumvolumen nach kleineren Attraktorregion – unter bestimmten Bedingungen – zu stabilisieren, sodaß verschiedene mit „Bedeutung“ (engl. “meaning”)¹³¹¹ behaftete Gerüche anhand von verschiedenen, ihnen zugeordneten Attraktorregionen kodiert werden.¹³¹²

Diese Attraktor-basierte nichtlineare Neurodynamik (engl. “nonlinear neurodynamics”)¹³¹³, die nach W.J. FREEMAN¹³¹⁴ eine neue Sichtweise der neuro-

-
- 1310 S. z.B. W.J. FREEMAN: *How Brains Make up their Minds*. Columbia University Press. New York. 2000. P. 80: “To use the language of dynamics (...) there is a single large attractor for the olfactory system, which has multiple wings that form an ‘attractor landscape.’ The system has a preferred basal AM (=amplitude modulation (A.d.V.)) pattern between inhalations, which is governed by one wing of the large attractor. When an inhalation brings in background air, the bulb transits to the basin of another attractor wing that gives the control AM pattern, and it returns to the basal wing after release during exhalation. This attractor landscape contains all the learned states as wings of the olfactory attractor, each of which is accessed when the appropriate stimulus is presented. Each attractor has its own basin of attraction, which was shaped by the class of stimuli the animals received during training. No matter where in each basin a stimulus puts the bulb, the bulb goes to the attractor of that basin, accomplishing generalization to the class.”
- 1311 S. z.B. W.J. FREEMAN: *Societies of Brains. A Study in the Neuroscience of Love and Hate*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1995. P. 100: “The meaning is not the pattern, nor is it in the pattern. It is the set of relations that is expressed by the pattern and enacted by the neurons sustaining it, which may include the entire forebrain, if one allows that neurons participate not only by discharging but also by actively remaining silent under inhibition, when that is required of them to form a pattern.”
- S. z.B. eingehend W.J. FREEMAN: *A Neurobiological Theory of Meaning in Perception*. Part 1. Information and Meaning in Nonconvergent and Nonlocal Brain Dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2493-2511, v.a. PP. 2494, 2495-96, 2500-2501, 2502-2503, 2507 – W.J. FREEMAN: *A Neurobiological Theory of Meaning in Perception*. Part 2. Spatial Patterns of Phase in Gamma EEG from Primary Sensory Cortices Reveal the Properties of Mesoscopic Wave Packets. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2513-35, v.a. PP. 2514-15.
- 1312 S. z.B. eingehend W.J. FREEMAN: *A Neurobiological Theory of Meaning in Perception*. Part 1. Information and Meaning in Nonconvergent and Nonlocal Brain Dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2493-2511, v.a. PP. 2494, 2495-96, 2500-2501, 2502-2503, 2507 – W.J. FREEMAN: *A Neurobiological Theory of Meaning in Perception*. Part 2. Spatial Patterns of Phase in Gamma EEG from Primary Sensory Cortices Reveal the Properties of Mesoscopic Wave Packets. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2513-35, v.a. PP. 2514-15.
- S. z.B. einführend A. SCHIERWAGEN: Modelle der Neuroinformatik als Mittler zwischen neurowissenschaftlichen Fakten und Kognitionstheorien. In: J.F. MAAS: *Das sichtbare Denken. Modelle und Modellhaftigkeit in der Philosophie und den Wissenschaften*. Editions Rodopi B.V. Amsterdam, Atlanta/GA. 1993. S. 151 – V.G. HARDCASTLE: *The Binding Problem*. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. P. 564.
- 1313 S. z.B. W.J. FREEMAN (Ed.): *Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics*. Springer-Verlag. London/UK. 2000. PP. 1-24, v.a. PP. 20-21.
- 1314 S. z.B. W.J. FREEMAN: *Societies of Brains. A Study in the Neuroscience of Love and Hate*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1995. P. 25: “My view is that nonlinear dynamics despite its difficulties (...) and limitations (...) provides the best available new tools to explore brain function. It enable us to use deterministic equations to create novel patterns that are analogous to the novel patterns created by brains using neurons. Owing to the power of its tools, nonlinear

kognitiven Funktionen liefert, zeichnet sich demnach vor allem dadurch aus, daß (1) anhand einer hohen Anzahl von parallelen Rückkopplungsfaserverbindungen zwischen der Riechrinde und dem Riechkolben, dieser in den gesamten bedeutungstragenden Wahrnehmungsvorgang bis zum Erkennen und Handeln eingebunden bleibt, sodaß bereits in dieser frühen Informationsverarbeitungsstufe den eintreffenden Geruchsreizen eine „Bedeutung“¹³¹⁵ zugewiesen wird, und (2) die temporalen Synchronisationsmechanismen der kollektiven neuronalen Aktivität, die die Einzelerregungen, die von demselben Geruchsreiz hervorgerufen werden, zusammenbinden, es ermöglichen, daß sich eine bedeutungstragende Wahrnehmung vor dem Hintergrund der sonstigen neuralen Aktivität abheben kann.¹³¹⁶

5.2.01.2 Seit den siebziger Jahren des 20. Jhd'ts entwickelte W.J. FREEMAN – eng an den neurophysiologischen Befunden orientiert¹³¹⁷ – eine Hierarchie von Architekturmodellen der kortikalen nichtlinearen Neurodynamik, die sog. “K0-KV (KATCHALSKY) Set Attractor Network Models”¹³¹⁸, basierend auf den

dynamics may play a pivotal role in studies of intentionality by providing a language for making bridges between measurements of brain activity and observations of behavior, including introspection, falling in and out of love, and dealing with hatred as it comes.”

S. auch F.D. ABRAHMAN / R.H. ABRAHMAN / C.D. SHAW / A. GARFINKEL: A Visual Introduction to Dynamical System Theory for Psychology. Aerial Press. Santa Cruz. 1990 – E. BAŞAR / H. HAKEN: Brain Function and Oscillations: Integrative Brain Function. Neurophysiology and Cognitive Processes. Springer. Berlin u.a. 1999.

S. zusammenfassend i.B.a. die Interpretation dieser neuen Sichtweise der funktionellen Neurodynamik i.S. W. FREEMAN's z.B. O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 20-21.

1315 S. Fn. 1310.

1316 S. z.B. eingehend W.J. FREEMAN: A Neurobiological Theory of Meaning in Perception. Part 1. Information and Meaning in Nonconvergent and Nonlocal Brain Dynamics. International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 13. 2003. PP. 2493-2511, v.a. PP. 2494, 2495-96, 2500-2501, 2502-2503, 2507 – W.J. FREEMAN: A Neurobiological Theory of Meaning in Perception. Part 2. Spatial Patterns of Phase in Gamma EEG from Primary Sensory Cortices Reveal the Properties of Mesoscopic Wave Packets. International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 13. 2003. PP. 2513-35, v.a. PP. 2514-15.

S. z.B. einführend L. HUBER: Wie das Neue in die Gehirne kommt. Emergenz und Chaos in neuronalen Prozessen. In: L. HUBER (Hrsg.): Wie das Neue in die Welt kommt. Phasenübergänge in Natur und Kultur. WUV. Wien. 2000. S. 162-65.

1317 S. z.B. Y. YAO / W.J. FREEMAN: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks. Vol. 3. No. 2. 1990. PP. 153-70, v.a. PP. 154-55 mit Hinweis auf W.J. FREEMAN: Waves, Pulses and the Theory of Neural Masses. Progress in Theoretical Biology. Vol. 2. 1972. PP. 87-165 – W.J. FREEMAN: How Brains Make up their Minds. Columbia University Press. New York. 2000. PP. 68, 69.

1318 Grundlegend hierzu s. z.B. W.J. FREEMAN: Mass Action in the Nervous System. Academic Press. New York u.a. 1975. PP. 25-50 – W.J. FREEMAN: Simulation of Chaotic EEG Patterns with a Dynamic Model of the Olfactory System. Biological Cybernetics. Vol. 56. 1987. PP. 139-50, v.a. PP. 140-42 – Y. YAO / W.J. FREEMAN: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks. Vol. 3. No. 2. 1990. PP. 153-70, v.a. PP. 155-57 – R. KOZMA / W.F. FREEMAN: The KIV Model of Intentional Dynamics and Decision Making. Neural Networks. Vol. 22. 2009. PP. 277-85.

S. auch W.J. FREEMAN: How Brains Make up their Minds. Columbia University Press. New York. 2000. PP. 35-36.

Einen Überblick findet man z.B. in R. KOZMA / W.J. FREEMAN: The KIV Model of Intentional Dyna-

sog. "KATCHALSKY¹³¹⁹ sets" mit den Komponenten K0, KI, KII, KIII, KIV und KV, die – mit zunehmender Komplexität und Funktionalität – die kortikale Architektur modellieren.¹³²⁰

Die Basiskomponente K0 beschreibt dabei eine kortikale Mikrokolumne mit einer Population von etwa 10^4 Neuronen, deren Dynamik anhand einer gewöhnlichen Differentialgleichung zweiter Ordnung (engl. "second order ordinary differential equation") bestimmt wird gemäß¹³²¹:

$$a \cdot b \frac{d^2 P(t)}{dt^2} + (a+b) \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = F(t), \quad (125)$$

wobei a und b biologisch determinierte Zeitkonstanten sind, $P(t)$ die Aktivierung eines Knotens als Funktion der Zeit bezeichnet, $F(t)$ die aufsummierte Aktivierung von Nachbarknoten und der sonstigen (gewichteten) Eingabe. Darüberhinaus besitzt die Basiskomponente K0 eine asymptotische sigmoide (Ausgabe-)Funktion $Q(x)$ mit einem (Steigungs-)Parameter q gemäß²⁰:

$$Q(x) = q \cdot \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-1}{q(e^x - 1)}\right) \right\}. \quad (126)$$

mics and Decision Making. *Neural Networks*. Vol. 22. 2009. PP. 277-85, v.a. PP. 278-79, 281 – L.I. PERLOVSKY / R. KOZMA: *Neurodynamics of Cognition and Consciousness*. In: L.I. PERLOVSKY / R. KOZMA: *Neurodynamics of Cognition and Consciousness*. SPRINGER-Verlag. Berlin u.a. 2007. PP. 1-8.

1319 Benannt nach dem israelischen Physikochemiker Aharon (KATZIR) KATCHALSKY.

S. hierzu z.B. R. KOZMA / W.J. FREEMAN: *The KIV Model of Intentional Dynamics and Decision Making*. *Neural Networks*. Vol. 22. 2009. P. 278.

1320 S. z.B. R. KOZMA / W.J. FREEMAN: *The KIV Model of Intentional Dynamics and Decision Making*. *Neural Networks*. Vol. 22. 2009. PP. 277-85, v.a. P. 281: "The basic K-unit, called K0 set, models a neuron population of about 10^4 neurons. (...) Coupling two or more K0 sets with excitatory connections, we get a KI. The next step in the hierarchy is the KII model. KII is a double layer of excitatory and inhibitory units. In the simplest architecture there are 4 nodes: two excitatory, denoted e , and two inhibitory, denoted i , nodes. The excitatory and inhibitory nodes in a KII set are arranged in corresponding layers, so KII has a double-layer structure. Given proper initial conditions, this model may produce sustained periodic oscillations the frequency and magnitude of which are determined by the interconnection weights between units. KIII consists of three double layers of KII sets that are connected with no-delay feed-forward connections and delayed feed-back connections. Properly tuned KIII models typically exhibit non-convergent chaotic behavior due to the competition of KII oscillators. KIII is the model of sensory cortices. Finally, several KIII and/or KII sets form the multi-sensory KIV set, (...) KIV is capable of exhibiting intermittent spatio-temporal synchronization, as the result of interacting chaotic KIII and KII oscillatory units."

1321 S. z.B. R. KOZMA / W.J. FREEMAN: *The KIV Model of Intentional Dynamics and Decision Making*. *Neural Networks*. Vol. 22. 2009. PP. 277-85, v.a. P. 281 mit Hinweis auf W.J. FREEMAN: *Mass Action in the Nervous System. Examination of the Neurophysiological Basis of Adaptive Behavior through the EEG*. Academic Press. New York u.a. 1975. PP. 94-103, 106-10.

5.2.02 MORPHODYNAMIC ATTRACTOR MODEL NACH J. PETITOT

5.2.02.1 Indem der französische Mathematiker, Kognitionswissenschaftler und Philosoph Jean PETITOT(-COCORDA)¹³²² Konzepte aus der sog. „Katastrophentheorie“ (engl. “catastrophe theory”) nach R. THOM¹³²³ mit denen aus der sog. „kognitiven Grammatik“ (engl. “cognitive grammar”) nach R. LANGACKER¹³²⁴ verbindet, versucht er mit seinem sog. „Morphodynamischen Attraktormodell“ (engl. “Morphodynamic Attractor Model”) ¹³²⁵ vor allem das Problem der syntaktischen Konstituenz (engl. “syntactic constituency”) in der Linguistik anzugehen, d.h., im Rahmen dieses dynamischen Modells der Syntax und Semantik geht man davon aus, daß ein Satz einer natürlichen Sprache anhand von dynamischen Attraktor- und Bifurkationskonzepten, den

1322 Zur Person Jean PETITOT's siehe die Website <http://www.crea.polytechnique.fr/JeanPetitot/-home.html>.

1323 Grundlegend s. z.B. R. THOM: Structural Stability and Morphogenesis. An Outline of a General Theory of Models. Benjamin/Cummings. Reading/MA, u.a. (1972) 1980 – R. THOM: Mathematical Models of Morphogenesis. Horwood. Chichester. 1983 – R. THOM: Semiophysics. Addison-Wesley. Redwood City/CA. 1989.

Einführend i.B.a. die Mathematik s. z.B. R. GILMORE: Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. Wiley. New York. 1980 – G. JETSCHKE: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nicht-linearer dynamischer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie. Vieweg. Braunschweig. 1989. S. 171-82.

Einführend i.B.a. die Linguistik s. z.B. W. WILDGEN: Archetypensemantik. Grundlagen für eine dynamische Semantik auf der Basis der Katastrophentheorie. Narr Verlag. Tübingen. 1985. S. 63-65, 69-71, 72-86, 266-95 – W. WILDGEN: Teil I: Das dynamische Paradigma in der Linguistik. In: W. WILDGEN / L. MOTTRON (Hrsg.): Dynamische Sprachtheorie. Sprachbeschreibung und Sprachklärung nach den Prinzipien der Selbstorganisation und der Morphogenese. Studienverlag Brockmeyer. Bochum. 1987. S. 35-49 – W. WILDGEN / P. PLATH: Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung. In: Internationales Handbuch der quantitativen Linguistik. Walter De Gruyter. Berlin. 2005. S. 690-99.

Die sog. „Katastrophentheorie“ (engl. “catastrophe theory”) kann man als einen Zweig der sog. „Bifurkationstheorie“ (engl. “bifurcation theory”) im Rahmen der Analyse von nichtlinearen dynamischen Systemen betrachten.

S. hierzu z.B. H. HAKEN: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. PP. 133-46.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.2.

1324 Grundlegend s. z.B. R.W. LANGACKER: Foundations of Cognitive Grammar. Vol. 1. Stanford University Press. Stanford/CA. 1987 – R.W. LANGACKER: Foundations of Cognitive Grammar. Vol. 2. Stanford University Press. Stanford/CA. 1991.

Einführend s. z.B. W. WILDGEN: Die Sprachwissenschaft des 20. Jahrhunderts. Versuch einer Bilanz. Walter De Gruyter. Berlin, New York. 2010. S. 156-59.

1325 Grundlegend s. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011 – J. PETITOT: Morphodynamics and Attractor Syntax: Constituency in Visual Perception and Cognitive Grammar. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 227-81 – J. PETITOT: Natural Dynamical Models for Cognitive Grammars. In: Fr.D. MANJALI (Ed.): Language and Cognition. Bahri Publications. New Delhi. 1993. PP. 81-104, v.a. PP. 94-101.

Zu einer sog. “Active Morphodynamical Semantics”, basierend auf gekoppelten Oszillatoren mit einer (Phasengradienten-)Synchronisation, s. R. DOURSAT / J. PETITOT: Dynamical Systems and Cognitive Linguistics: Toward an Active Morphodynamical Semantics. Neural Networks. Vol. 18. 2005. PP. 628-38.

sog. „(elementaren) Katastrophen“ (engl. „(elementary) catastrophes“)¹³²⁶, neuronal instantiiert wird, m.a.W. die syntaktische Struktur eines Satzes wird dominiert von kritischen und dramatischen Phasenübergängen, bewirkt anhand von bestimmten (Kontroll-)Parametereinstellungen in den betreffenden Differentialgleichungen, die komplette qualitative Transformationen in der dynamischen Konfiguration der Attraktoren im Phasenraum zur Folge haben, eben die bereits erwähnten und so bezeichneten Elementarkatastrophen. Die geometrische Interpretation dieser kritischen Parameterwerte in den strukturell stabilen Polynomen der Differentialgleichungen des jeweiligen Systems erzeugt dann nach den sog. „Klassifikationstheoremen“ (engl. „classification theorems“)¹³²⁷ i.S. R. THOM's, E.Chr. ZEEMAN's und V.I. ARNOLD's komplexe, archetypische geometrische Objekte, wie z.B.

(1) die sog. „Kuspe“ (engl. „cusp“) gemäß einer Differentialgleichung vierten Grades¹³²⁸:

$$f_{u,v}(x) = x^4 + ux^2 + vx, \quad (127)$$

wobei die Kontrollparameter u, v nach E.Chr. ZEEMAN¹³²⁹ als sog. „splitting factor“ und als sog. „normal factor“ bezeichnet werden¹³³⁰,

(2) der sog. „Schwalbenschwanz“ (engl. „swallowtail“) gemäß einer Differentialgleichung fünften Grades¹³³¹:

$$f_{u,v,w}(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx, \quad (128)$$

(3) der sog. „Schmetterling“ (engl. „butterfly“) gemäß einer Differentialglei-

1326 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 210-11, Fn. 10.

1327 Grundlegend s. z.B. R. THOM: Structural Stability and Morphogenesis. An Outline of a General Theory of Models. Benjamin/Cummings. Reading/MA, u.a. (1972) 1980 PP. 60-93.

Eingehend s. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 220-21.

Einführend s. z.B. W. WILDGEN / P. PLATH: Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung. In: Internationales Handbuch der quantitativen Linguistik. Walter De Gruyter. Berlin. 2005. S. 691-94, v.a. S. 692 – W. WILDGEN: Archetypensemantik. Grundlagen für eine dynamische Semantik auf der Basis der Katastrophentheorie. Narr Verlag. Tübingen. 1985. S. 72-86, v.a. S. 74 – W. WILDGEN: Teil I: Das dynamische Paradigma in der Linguistik. In: W. WILDGEN / L. MOTTARON (Hrsg.): Dynamische Sprachtheorie. Sprachbeschreibung und Sprachklärung nach den Prinzipien der Selbstorganisation und der Morphogenese. Studienverlag Brockmeyer. Bochum. 1987. S. 44-49.

Das Theorem wird auch als sog. „unfolding theorem“ bezeichnet.

1328 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 221-23.

1329 S. z.B. E.Chr. ZEEMAN: Catastrophe Theory. Scientific American. Vol. 234. 1976. P. 78.

S. einführend zum Ansatz der Katastrophentheorie i.S. E.Chr. ZEEMAN's E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992. S. 95-97.

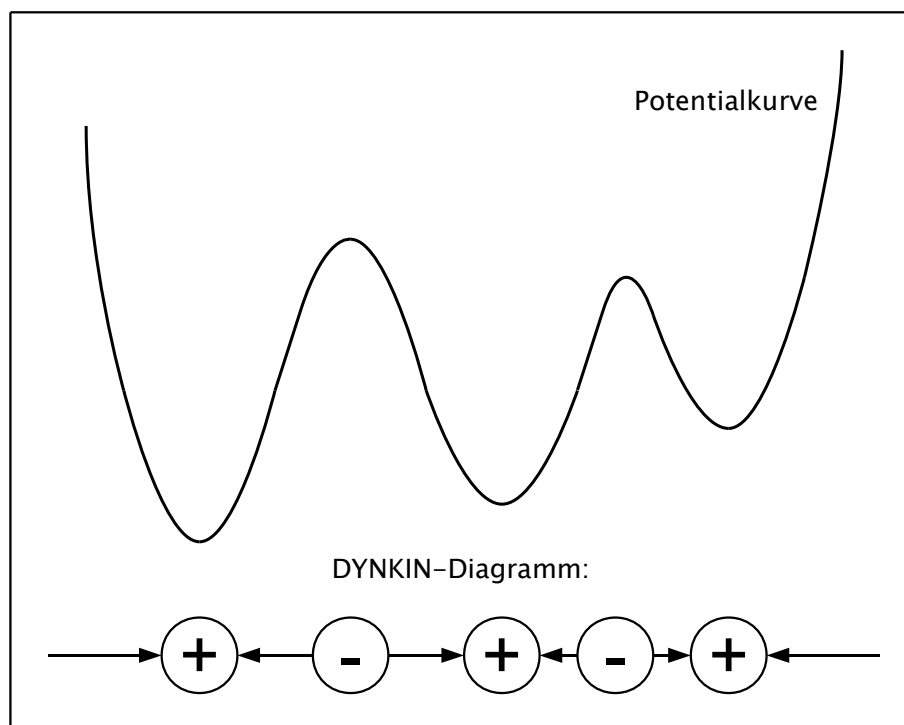
1330 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. P. 222.

1331 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 223-26.

chung sechsten Grades¹³³² (s. Graphik.42):

$$f_{t,u,v,w}(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx. \quad (129)$$

Unter der Annahme, daß das neuronale System im Sinne eines Gradientensystems¹³³³ beschrieben werden kann, gibt es nun nur eine kleine Menge von Transformationen von einer Attraktorkonfiguration in eine andere, wobei die-



Graphik.42: Schematische Darstellung der Potentialkurve des sog. „Schmetterlings“ (engl. „butterfly“) (oben) mit dem dazugehörigen DYNKIN-Diagramm (unten) (in Anlehnung an W. WILDGEN / P. PLATH: Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung. In: Internationales Handbuch der quantitativen Linguistik. Walter De Gruyter. Berlin. 2005. S. 15).

se Transformationen als universelle kognitive Archetypen von Relationen zwischen den syntaktischen Funktionen bzw. Aktantenrollen (engl. „actantial roles“), wie z.B. Agent, Rezipient usw., betrachtet werden, sodaß damit auch das Problem der Füller/Rolle-Bindungen angegangen werden kann, wobei dieses jedoch nach J. PETITOT hinter das Hauptproblem zurücktritt, das darin besteht, daß die Relationen der Aktanteninteraktionen spezifiziert werden anhand der konfiguralen Definition der syntaktischen Funktionen, d.h. anhand einer Position im Rahmen einer Konfiguration von Positionen i.S. der (Attraktor-)Topologie (sog. „Attraktorsyntax“ (engl. „attractor syntax“), m.a.W. anhand einer Sequenz von Bifurkationen von komplexen Attraktoren

1332 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 226-28.

1333 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.23.

im Rahmen der neuronalen algorithmischen Systemdynamik (sog. „dynamischer Funktionalismus“ (engl. „dynamical functionalism“)).¹³³⁴ Nach der Katastrophentheorie R. THOM's werden dann die Attraktoren als Minima einer Potentialfunktion als Aktanten i.S. einer syntaktischen Position, die erzeugten Potentiale einer Potential- bzw. LYAPUNOV-Funktion¹³³⁵ als ein Erzeuger für die Relationen zwischen den Aktanten, ein Zeitpfad der Potentiale i.S. eines Vektorflusses bzw. -stroms als ein Transformationsprozeß dieser Relationen

¹³³⁴ Grundlegend s. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 196-204, 215.

S. auch J. PETITOT: Why Connectionism is such a Good Thing: A Criticism of Fodor and Pylyshyn's Criticism of Smolensky. Philosophica (Belgium). 1991. PP. 49-79 – J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 187-225.

S. eingehend z.B. J. PETITOT: Morphodynamics and Attractor Syntax: Constituency in Visual Perception and Cognitive Grammar. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 233-34, 243: "If the actants A_i of a process are modeled by attractors \mathcal{A}_i , a dynamical system, is it possible, within the framework of the mathematical theory of dynamical systems, to elaborate a geometric theory of actantial interactions – i.e. a theory of the verb and its participants?"

In many dynamical models the situation can be greatly simplified if one makes the hypothesis that the dynamics X defining the attractors \mathcal{A}_i admits a global Lyapunov function (...) or, even more simply, that $X = -\text{grad } f$. The \mathcal{A}_i are then the minima m_i of the potential function f . The main question can thus be simplified: *If the actants A_i of a process are modeled by the minima m_i of a potential function, is it possible, within the framework of the dynamical theory of potential functions, to elaborate a theory of actantial interactions – i.e., a theory of the verb?*

The mathematical challenge is therefore to develop a theory of interactions of attractors, what we call an *attractor syntax*. (...)

Note that here we will not be discussing what has come to be known as the *binding problem*. The way by which one can bind a role label with a filler term is certainly a fundamental issue. But the main problem in this chapter is that of the configurational definition which can substitute for role labels. We will see that in such a definition roles are identified with *positions* – places – in configurations of positions. Of course, these places have to be filled by terms (particular attractors; see Contents and Complex Attractors, below)."

(...)

"Contents and Complex Attractors In brain modeling, we can suppose, owing to the oscillatory nature of the brain, that the attractors come from the coupling of limit cycles. (...) *The (complex) topology of such a strange brain attractor can be identified with the content of the correlated mental state*. In reducing the attractors to points in a quasi-gradient model we *therefore reduce these mental contents to unanalyzable units*. This reduction is equivalent in the morphodynamical approach to the classic reduction of semantic units to formal symbols. The main difference is that the *relations* between these units *are no longer of symbolic nature*: they are dynamically generated by an optimization device (minimizing a Lyapunov function)."

S. auch J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 183-204, v.a. PP. 199, 201, 203, 215: "(...) the main problem is the configurational definition of roles, which can substitute for the classical role labels. (...) in such a configurational definition, roles are identified with positions or "places" in configurations of positions. Of course, these places have to be filled by fillers, but the key difficulty is to elaborate a CN [connectionist (A.d.V.)] theory of such positional relations without taking for granted any prior CL [classic (A.d.V.)] representation of them."

(...)

"(...) the problem is (...) to give a correct, purely CN account of the *relations of actantial interactions* which are involved in syntactic structures. These relations are not binding relations. They concern the roles independently of their fillers. The PTC [Proper Treatment of Connectionism

zwischen den Aktanten, und die Interaktionen der Aktanten an den Bifurkationen als Verben betrachtet.¹³³⁶

5.2.02.2 Ebenfalls auf der Katastrophentheorie R. THOM's aufbauend hat auch W. WILDGEN mit seiner sog. „Archetypensemantik“ (engl. “archetypal semantics”)¹³³⁷ ein dynamisches (Attraktor-)Modell der kognitiven Linguistik entwickelt.

(A.d.V.)) agenda (...) must also be applied to the configurational definition of the actantial roles.”

(...)

“Morphodynamics aims at explaining natural morphologies and iconic, schematic, Gestalt-like aspects of structures, whatever their underlying physical substrate may be, using the mathematical theory of dynamical systems. Syntactic structures can be treated as Gestalts and can be morphodynamically modeled.

One must carefully distinguish between the formal description of symbolic structures on the one hand and their dynamical explanation on the other. It is not because the former is correct that one is committed to a symbolic conception of mental states and processes. In morphodynamics, the conceptual contents of mental states are no longer identified with symbols. Their meaning is embodied in the cognitive processing itself. More precisely, it is identified with the topology of the complex attractors of the underlying neural dynamics, and the mental events are identified with sequences of bifurcations of such attractors. Symbolic structures are conceived of as macro-structures emerging from the underlying micro-neurodynamics. Information processing is therefore thought of not as an implemented symbolic processing but as a *dynamical process*.”

S. einführend z.B. J. PETITOT: Morphodynamics and Attractor Syntax: Constituency in Visual Perception and Cognitive Grammar. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 229-30 (Editors' Introduction): “For classes of very elementary dynamical systems – namely, ‘gradient descent’ systems, in which the only form of behavior is settling into a point attractor – it is possible to classify the various kinds of interactions of attractors. For each of these ‘elementary’ catastrophes, there is just a small set of qualitatively different ways in which boundaries can be crossed; or in other words, a small set of transformations from one qualitative arrangement of attractors to another. Now, let us hypothesize that the behavior of the brain can be described, at some suitable high level, in terms of gradient systems. From this it follows that there is a strictly limited set of ways in which the dynamics of the brain transforms from one qualitative arrangement to another.

In Thom's and Petitot's theory, these transformations are treated as universal cognitive archetypes for relations between semantic roles. Each basic elementary and nuclear sentence of natural language, as the expression of a possible thought, is syntactically structured by one of these cognitive archetypes. The main verb corresponds to the catastrophe transformation as a whole, while the individual terms correspond to the distinct attractors. Since there are a vast number of distinct sentences, many sentences correspond to each cognitive archetype. Differences in the particular semantic content of a sentence falling under a common archetype (i.e., the difference between ‘John gives the book to Mary’ and ‘Mary sends e-mail to Bob’) correspond to differences in the global semantics of the scene (in Fillmore's sense) and in the internal nature of the attractors themselves.

In the limited set of basic catastrophe transformations, there is only a fixed number of positions that attractors can occupy with respect to other attractors (e.g., one being swallowed up by another). A key claim of Petitot's morphodynamical approach to syntax is that these positions correspond to what European linguists call ‘actants’ or ‘actantial roles’ and American linguists often refer to as case roles (Agent, Patient, etc.). Thus the morphodynamical approach can account for the fact that all natural languages appear to draw their cases from a limited set of universal types. Further, the approach provides what Petitot calls a ‘configurational definition’ of case roles. An Agent is an Agent because of the particular place of the corresponding attractor

within a specific catastrophe transformations of attractor arrangements or configurations."

1335 S. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang, Bern, Berlin u.a. 2011. P. 214.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kpt. 2.232, Fn. 379, 4.23.

1336 S. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang, Bern, Berlin u.a. 2011. PP. 213, 220-21, 228-39, v.a. P. 231: "For topological models of syntax, Thom's main idea was the following. We start with a general morphodynamical model of gradient type. Let f be a (germ of) potential on an internal manifold M . (...) Let (f_w, W, K) be the universal unfolding of f (...). (...) we consider the product $M \times W$ of the internal space M (on which the f_w are defined) by the external space W . (...) We have seen (...) that connectionist models have also used this idea, but only for the theory of learning (W is then the space of synaptic weights which vary slowly, adiabatically, along the trajectories of the back-propagation dynamics). Here, it is used for a completely different purpose: to model the *categorical difference between actant and verb*.

We use then the universal unfolding (f_w, W, K) as a geometrical generator for events of interaction between attractors. We introduce temporal paths $\gamma = w(t)$ in the external space W and consider that they are driven by slow external dynamics. When γ crosses K , bifurcation events occur. They are events of interaction of quadratic critical points. Thom's idea is then to interpret the minima of the f_w – the attractors of the internal dynamics – as 'actants', the generating potential f_w as a generator of relations between them, a temporal path $f_{w(t)}$ as a process of transformation of these relations, and the interaction of actants at the crossing of K as a verbal node."

S. auch J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang, Bern, Berlin u.a. 2011. P. 231 mit einer englischen Übersetzung eines französischen Zitats von R. THOM: Modèles Mathématiques de la Morphogenèse. Christian Bourgeois. Paris. 1980. P. 188: "If one interprets the stable local regimes (of the fast internal dynamics) as actants, it becomes possible to give the qualitative appearance of catastrophes a semantic interpretation, expressed in natural language. If (...) one introduces time (i.e. a slow external dynamics), [the bifurcations (A.d.V.)] are interpreted as verbs."

(...)

"One gets that way what I think is the universal structural table, which contains all types of elementary sentences."

1337 S. z.B. W. WILDGEN: Archetypensemantik. Grundlagen für eine dynamische Semantik auf der Basis der Katastrophentheorie. Narr Verlag, Tübingen. 1985.

S. auch W. WILDGEN: Teil I: Das dynamische Paradigma in der Linguistik. In: W. WILDGEN / L. MOTTRON (Hrsg.): Dynamische Sprachtheorie. Sprachbeschreibung und Sprachklärung nach den Prinzipien der Selbstorganisation und der Morphogenese. Studienverlag Brockmeyer, Bochum. 1987. S. 6-232 – W. WILDGEN / P. PLATH: Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung. In: Internationales Handbuch der quantitativen Linguistik. Walter De Gruyter, Berlin. 2005. S. 688-703.

5.2.03 SYNFIRES CHAINS UND CORTICONICS NACH M. ABELES

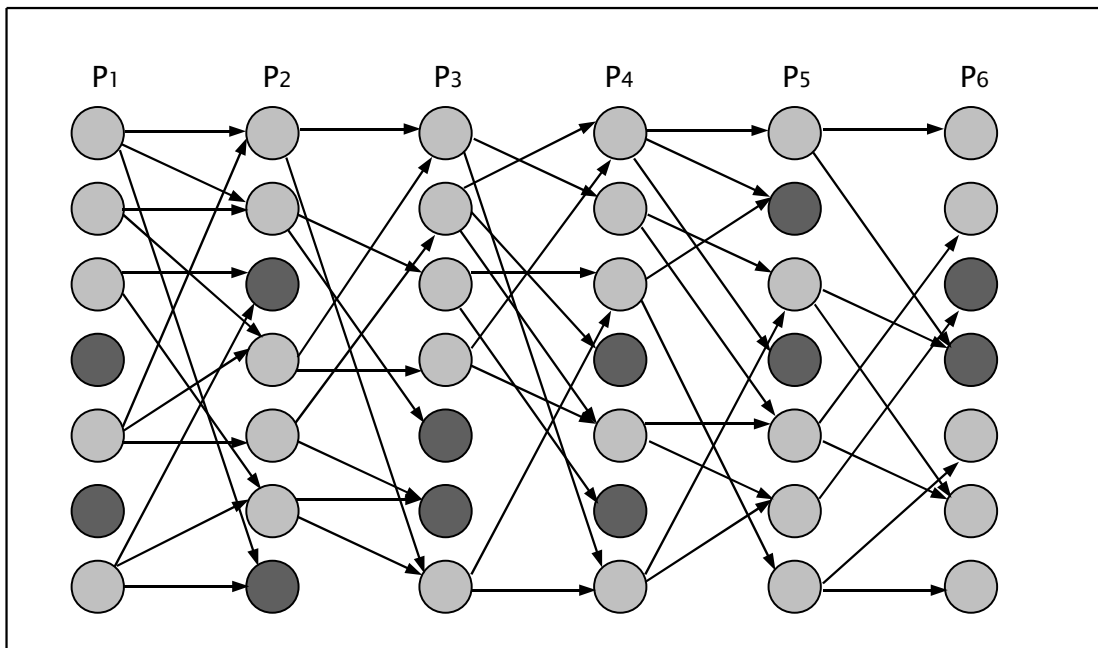
5.2.03.1 Da experimentell eine selektive Sensitivität von kortikalen Neuronen hin zu einer synchroneren Aktivität über eine hohe Anzahl von Interneuronschichten nachgewiesen worden war¹³³⁸, hat der israelische Neurophysiologe und technische Biomediziner Moshe ABELES¹³³⁹ mit Untersuchungen am Frontalkortex beim Affen¹³⁴⁰ ein entsprechendes Architekturmodell vorgeschlagen, das sog. "Synfire Chain (SFC) Model"¹³⁴¹, bestehend aus einem vorwärtsgerichteten Netzwerk (engl. "feedforward network")¹³⁴² mit einer

-
- 1338 S. z.B. M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag, New York, 1994. P. 134 m.w.Lit.: Chr. KOCH / R.J. DOUGLAS / U. WEHMEIER: Visibility of a Synaptically Induced Conductance Changes: Theory and Simulations of Anatomically Characterized Cortical Pyramidal Cells. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 10. 1990. PP. 1728-44 – I. NELKEN: Analysis of the Activity of Single Neurons in Stochastic Settings. *Biological Cybernetics*. Vol. 59. 1988. PP. 201-15 – A.D. REYES / E.E. FETZ: Effects of Transient Depolarizing Potentials on the Firing Rate of Neocortical Neurons. *Journal of Neurophysiology*. 1993. PP. 1673-83.
- 1339 Zur Person Moshe ABELES's siehe die Website <http://www.emetprize.org/english/Product.aspx?Product=50&Year=2004>.
- 1340 S. z.B. Y. PRUT / E. VAADIA / H. BERGMANN / I. HAALMAN / H. SLOVIN / M. ABELES: Spatiotemporal Structure of Cortical Activity. Properties and Behavioral Relevance. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 79. 1998. PP. 2857-74, v.a. P. 2857 – M. ABELES / Y. PRUT: Spatio-Temporal Firing Patterns in the Frontal Cortex of Behaving Monkeys. *Journal of Physiology Paris*. Vol. 90. 1996. PP. 249-50 – A. AERTSEN / E. VAADIA / M. ABELES / E. AHISSAR / H. BERGMAN / B. KARMON / Y. LAVNER / E. MARGALIT / I. NELKEN / St. ROTTER: Neural Interactions in the Frontal Cortex of a Behaving Monkey: Signs of Dependence on Stimulus Context and Behavioral State. *Journal für Hirnforschung*. Vol. 32. 1991. PP. 735-43 .
S. auch Y. IKEGAYA / G. AARON / R. COSSART / D. ARONOV / I. LAMPL / D. FERSTER / R. YUSTE: Synfire Chains and Cortical Songs: Temporal Modules of Cortical Activity. *Science*. Vol. 304. 2004. PP. 559-64, v.a. P. 564, die experimentelle Belege von "synfire chains" im primären visuellen Kortex von Mäusen und Katzen vorlegen.
- 1341 Grundlegend s. z.B. M. ABELES: Role of the Cortical Neuron: Integrator or Coincidence Detector? *Israel Journal of Medical Sciences*. Vol. 18. 1982. PP. 83-92, v.a. PP. 90-92 – M. ABELES: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer Verl. Berlin. 1982. PP. 67-75 – M. ABELES: Corticonics: Neural Circuits of the Cerebral Cortex. Cambridge University Press. Cambridge 1991. PP. 227-59, v.a. PP. 232-35.
Einführend s. z.B. M. ABELES: Synfire Chains. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1143-46 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): *Models of Neural Networks II*. Chapt. 3. Springer-Verlag, New York. 1994. PP. 121-40, v.a. PP. 134-38 mit einer Abbildung (P. 135) zur Struktur der "synfire chains".
S. auch O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 18-19 – A. ZIEMKE / S. CARDOSO DE OLIVEIRA: Neuronale Repräsentationen. Zum Repräsentationalistischen Forschungsprogramm in der Kognitionsforschung. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Repräsentationismus – was sonst?* Braunschweig. 1996. S. 1-28, v.a. S. 23 – A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHE-RY / M. WERNING (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 618.
S. auch M. DIEMANN / M.-O. GEWALTIG / A. AERTSEN: Stable Propagation of Synchronous Spiking in Cortical Neural Networks. *Nature*. Vol. 402. 1999. PP. 529-33.
- 1342 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.25.01.

hohen Anzahl von Schichten, m.a.W. aus einer „Kette“ (engl. “chain”) von „Pools“ von Neuronen, die über divergierende und konvergierende exzitatorische Synapsen verbunden sind, sodaß das dominante neurale Funktionsprinzip darin bestünde, daß ein einzelnes Neuron nicht mehr dann aktiv werden würde, wenn es die eingehenden, überschwellig exzitatorischen Entladungen einer hohen Anzahl von vorgeschalteten Neuronen über einen gewissen Zeitraum hinweg „integriert“ (engl. “integrate”)¹³⁴³, sondern als ein sog. „Koinzidenzdetektor“ (engl. “coincidence detector”)¹³⁴⁴ zu betrachten ist, d.h. dann aktiv wird, wenn die synchrone Aktivität einiger weniger exzitatorischer Entladungen den Schwellenwert überschreitet. Falls sich nun eine “synfire chain” im Synchronisationsmodus befindet, wird demnach jeder Verband von Neuronen eine – im Zeitbereich von einer Millisekunde – annähernd synchronisierte Salve (engl. “synchronized volley”)¹³⁴⁵ abgeben, die einen weiteren Verband synchron aktivieren wird, und so weiter, sodaß eine depolarisierende Welle, eine sog. “synfire wave”¹³⁴⁶ in der jeweils nächsten Neuronenschicht induziert wird, wobei dasselbe Neuron von Zeit zu Zeit zu einer Vielzahl von verschiedenen „Pools“ gehören kann, abhängig davon, in Bezug auf welchen Verband seine neurale Aktivität gerade korreliert wäre.

5.2.03.2 Die Hauptanwendung dieses Modells besteht nun nach E. BIENENSTOCK¹³⁴⁷ und M. ABELES et al.¹³⁴⁸ darin, daß anhand einer Synchronisation von neuronalen Aktivitätswellen (engl. “activity waves”) i.S. einer “synfire wave” eine „Verkettung“ in Form einer Überlagerung i.S. einer sog. „Superposition“ (engl. “superposition”)¹³⁴⁹ – basierend auf dem Prinzip der

-
- 1343 S. z.B. M. ABELES: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer Verl. Berlin. 1982. PP. 68-69 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. P. 134.
- 1344 S. z.B. M. ABELES: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer Verl. Berlin. 1982. PP. 25, 68-69 – M. ABELES: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag. New York. 1994. P. 134.
- 1345 S. z.B. M. ABELES: Synfire Chains. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1144.
- 1346 S. z.B. M. ABELES: Synfire Chains. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1144.
- 1347 S. z.B. E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 6. 1995. PP. 179-224 – E. BIENENSTOCK: Composition. In: A. AERTSEN / V. BRAITENBERG (Eds.): Brain Theory – Biological Basis and Computational Theory of Vision. Elsevier. Amsterdam, New York. 1996. PP. 269-300.
- 1348 S. z.B. M. ABELES / G. HAYON / D. LEHMANN: Modeling Compositionality by Dynamic Binding of Synfire Chains. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 17. 2004. PP. 179-201, v.a. PP. 183-87, 192-94, 195-97 mit der Verwendung einer sog. „Transfer Matrix Methode“ (engl. “transfer matrix method” (P. 183)) unter Hinweis auf M. ABELES: Corticonics: Neural Circuits of the Cerebral Cortex. Cambridge University Press. Cambridge 1991.
S. hierzu auch A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 620.
- 1349 S. z.B. E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 6. 1995. PP. 180, 189, 190-201.
S. auch die Ausführungen in Kap. 2.222.4.



Graphik.43: Schematische Darstellung einer sog. "Synfire Chain" (vereinfacht), bestehend aus hemmenden Neuronen (engl. "inhibitory neurons") (dunkelgrau) und aus erregenden Neuronen (engl. "excitatory neurons") (hellgrau): Entgegen dem klassischen Model eines Neurons als einem sog. „Integrator“ (engl. "integrator"), wonach ein Neuron dann aktiv wird, falls sein Schwellenwert durch die eingehenden erregenden Entladungen einer hohen Anzahl von vorgeschalteten Neuronen überschritten wird, wird im "Synfire Chain (SFC) Model" nach M. ABELES das Neuron als sog. „Koinzidenzdetektor“ (engl. "coincidence detector") betrachtet: Da bereits eine geringe Anzahl von eingehenden Entladungen zu einer überschwelligen synchronen Koaktivität eines Verbandes von Neuronen führt, entsteht unter bestimmten Bedingungen ein Einschwingen einer umfassenden Neuronenpopulation derart, daß es zu weiteren dynamischen Aktivitätskaskaden von bereits fast überschwelligen, angrenzenden Neuronenpopulationen führt, sodaß diese getakteten, großflächigen raumzeitlichen Wellenmuster stabile synchronisierte Aktivitätsmuster über eine Vielzahl von Interneuronschichten hinweg erzeugen können (angelehnt an M. ABELES / G. HAYON / D. LEHMANN: Modeling Compositionality by Dynamic Binding of Synfire Chains. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 17. 2004. PP. 180, 191).

synaptischen Plastizität D.O. HEBB's¹³⁵⁰ – von mehreren neuralen Verbänden i.S. einer "synfire chain" erzeugt werden kann (sog. "synfire-superposition hypothesis")¹³⁵¹, sodaß aus der dynamischen Bindung (engl. "dynamic binding")¹³⁵² von elementaren Komponenten eine bedeutungstragende kompositionale¹³⁵³ mentale Repräsentation (engl. "meaningful composite mental

1350 S. auch die Ausführungen in Kap. 2.213.

1351 S. z.B. E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 6. 1995. PP. 208-209.

1352 S. z.B. E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 6. 1995. PP. 219-20.

1353 Zum hier verwendeten Begriff der sog. „Kompositionalität“ (engl. "compositionality") im Rahmen der LEGO-Metapher s. z.B. E. BIENENSTOCK: Composition. In: A. AERTSEN / V. BRAITENBERG (Eds.): Brain Theory – Biological Basis and Computational Theory of Vision. Elsevier. Amsterdam,

representation") entsteht (s. Graphik.43).¹³⁵⁴ Damit erhält man – unter der Hinzunahme einer rekurrenten Graphenstruktur (sog. "reverberating-synfire dynamics") – ein klassisches assoziatives Gedächtnisspeichermodell, basierend auf dem Attraktorkonzept.¹³⁵⁵

New York. 1996. P. 277, v.a. Fn. 4.

1354 S. z.B. E. BIENENSTOCK: Composition. In: A. AERTSEN / V. BRAITENBERG (Eds.): Brain Theory – Biological Basis and Computational Theory of Vision. Elsevier. Amsterdam, New York. 1996. PP. 269-300, v.a. PP. 280-84, 288-96 – M. ABELES / G. HAYON / D. LEHMANN: Modeling Compositionality by Dynamic Binding of Synfire Chains. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 17. 2004. PP. 195-97.

S. einführend z.B. M. ABELES: Synfire Chains. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1144.

1355 S. z.B. E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 6. 1995. P. 210: "(...) one may envisage connectivity graphs intermediate between feedforward synfire chains and random graphs with feedback. Such graphs would contain multiple, irregularly arranged, feedback loops, leading to a reverberating-synfire dynamics (...). A network including a superposition of such graphs would qualify as a classical associative-memory model, with attractors defined in terms of firing rates, and would also retain important features of the synfire model."

Zum Begriff des sog. "synfire attractor" s. z.B. A. KUMAR / S. ROTTER / A. AERTSEN: Conditions for Propagating Synchronous Spiking and Asynchronous Firing Rates in a Cortical Network Model. Journal of Neuroscience. Vol. 28. 2008. PP. 5274-75.

5.2.04 MODULARE NEURODYNAMISCHE SYSTEME NACH FR. PASEMANN¹³⁵⁶

5.2.04.1 Ebenfalls ausgehend von der mathematischen Theorie der Dynamischen Systeme mit ihrem Modellkonzept des (chaotischen) Attraktors¹³⁵⁷ charakterisiert der Physiker und Kognitionswissenschaftler Frank PASEMANN¹³⁵⁸ ein kognitives System als ein sog. „modulares neurodynamisches System“¹³⁵⁹ in Form von modularen neuronalen Netzwerken (engl. „Modular Neural Networks (MNN)“) ¹³⁶⁰ bzw. von sog. „Neuromodulen“ (engl. „neuromodules“)¹³⁶¹, die anhand einer sog. „(formalen) modularen Neurodynamik“

1356 Dieses Kapitel ist eine zum Teil überarbeitete Fassung des Kapitels 6.442 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

1357 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.221 und 1.222.

1358 Zur Person Frank PASEMANN's siehe die Website <http://ikw.uni-osnabrueck.de/~neurokybernetik/-people/fpasemann.html>.

1359 Grundlegend s. z.B. Fr. PASEMANN: Neuromodules: A Dynamical Systems Approach to Brain Modelling. In: H.J. HERRMANN / D.E. WOLF / E. PÖPPEL (Eds.): Workshop on Supercomputing in Brain Research. From Tomography to Neural Networks. HLRZ, KFA Jülich, Germany, November 21-23, 1994. World Scientific Publishing Co. Singapore. 1995. PP. 331-47.

Eingehend in Bezug auf eine Synchronisationsdynamik zwischen sog. „chaotischen Neuromodulen“ (engl. „chaotic neuromodules“) s. z.B. T. WENNEKERS / Fr. PASEMANN: Synchronous Chaos in Highdimensional Modular Neural Networks. International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 6. 1996. PP. 2055-67, v.a. PP. 2055-56 – Fr. PASEMANN / T. WENNEKERS: Generalized and Partial Synchronization of Coupled Neural Networks. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 11. 2000. PP. 41-61, v.a. PP. 41-43, 43-47.

S. hierzu auch Fr. PASEMANN / N. STOLLENWERK: Attractor Switching by Neural Control of Chaotic Neurodynamics. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 9. 1998. PP. 549-61, v.a. PP. 550-52.

Zur Synchronisation einer Robotpopulation anhand einer sog. „coupled oscillator architecture“ s. z.B. S. WISCHMANN / M. HÜLSE / J. KNABE / Fr. PASEMANN: Synchronization of Internal Neural Rhythms in Multi-Robotic Systems. Adaptive Behaviour. Vol. 14. 2006. PP. 117-27 – Fr. PASEMANN / M. HILD / K. ZAHEDI: SO(2)-Networks as Neural Oscillators. In: J. Mira / J.R. ALVAREZ (Eds.): Computational Methods in Neural Modeling. Springer. Berlin u.a. 2003. PP. 144-51 – M. NEGRELLO / M. HUELSE / Fr. PASEMANN: Adaptive Neurodynamics. In: Y. SHAN / A. YANG (Eds.): Applications of Complex Adaptive Systems. IGI Publishing. Hershey/ PA. 2008. PP. 85-111.

Einführend s. z.B. Fr. PASEMANN: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 42-91, v.a. S. 74-80.

1360 S. z.B. T. WENNEKERS / Fr. PASEMANN: Synchronous Chaos in Highdimensional Modular Neural Networks. International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 6. 1996. PP. 2055-67, v.a. PP. 2057-58.

1361 S. z.B. Fr. PASEMANN: Neuromodules: A Dynamical Systems Approach to Brain Modelling. In: H.J. HERRMANN / D.E. WOLF / E. PÖPPEL (Eds.): Workshop on Supercomputing in Brain Research. From Tomography to Neural Networks. HLRZ, KFA Jülich, Germany, November 21-23, 1994. World Scientific Publishing Co. Singapore. 1995. PP. 332-33 – M. NEGRELLO / M. HUELSE / Fr. PASEMANN: Adaptive Neurodynamics. In: Y. SHAN / A. YANG (Eds.): Applications of Complex Adaptive Systems. IGI Publishing. Hershey/ PA. 2008. PP. 88-89.

Einführend s. z.B. Fr. PASEMANN: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 59-64, v.a. S. 59: „Im Sinne des modernen Konnektionismus versteht man – vereinfachend – unter einem sog. „Neuromodul“ (engl. „neuromodule“) ein meist funktional oder in seiner räumlichen

(engl. "(formal) modular neurodynamics")¹³⁶² i.S. der Chaostheorie¹³⁶³ beschrieben werden können und sich durch ihren hohen Grad an „funktionaler Flexibilität bei gleichbleibender Struktur der Systemelemente“ auszeichnen, weshalb sie auch als sog. „autotrope Systeme“ (engl. "autotrope systems")¹³⁶⁴ bezeichnet werden, d.h., die kognitiven Kompetenzen beruhen auf „einem Selbstorganisationsprozeß neuromodularer Strukturen“.

5.2.04.2 Daher ist nach Fr. PASEMANN¹³⁶⁵, in Anlehnung an den (Neuro-)Biologen und Philosophen Gerhard ROTH¹³⁶⁶, das Konzept der internen Repräsentation im Sinne einer „semantischen Konfiguration kohärenter (synchroner) Moduldynamiken“ zu verwenden: „[Die] Bedeutung von Signalfolgen

Architekturstruktur beschränktes kleineres neuronales Netzwerk, das im Rahmen eines größeren neuronalen Systems ein Subsystem darstellt.“

1362 S. z.B. Fr. PASEMANN: Neuromodules: A Dynamical Systems Approach to Brain Modelling. In: H.J. HERRMANN / D.E. WOLF / E. PÖPPEL (Eds.): Workshop on Supercomputing in Brain Research. From Tomography to Neural Networks. HLRZ, KFA Jülich, Germany, November 21-23, 1994. World Scientific Publishing Co. Singapore. 1995. PP. 334-46: Die modulare (chaotische) Neurodynamik wird dabei bestimmt anhand von einer dissipativen Aktivierungs- und Propagierungsfunktion. Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.211, v.a. Formel.17 und Formel.20.

S. auch Fr. PASEMANN: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 64-72, v.a. S. 56-57: „Da sich einerseits die Eingangssignale zu kognitiven Systemen wegen der sich ständig wandelnden Umweltsituationen ändern, und andererseits die innere Aktivität des Systems wegen der vielfachen Kopplungen Einfluß auf jedes Teilsystem nimmt, wird die Dynamik eines solchen Teilsystems meist in der Nähe eines Attraktors verlaufen und selten auf ihn gelangen; d.h. Neurodynamik ist im wesentlichen eine Transientendynamik. Wir werden der Dynamik eines Teilsystems 'Bedeutung' dann zuschreiben, wenn durch sie eine verhaltensrelevante Leistung des Systems ermöglicht wird, und wir gehen davon aus, daß eine Transientendynamik, die im gleichen Bassin des Teilsystems verläuft, letztlich die gleiche verhaltensrelevante Leistung bewirkt und damit die gleiche Bedeutung trägt. "Bedeutungsträger" ist also das Bassin eines Attraktors, d.h. die Menge aller Zustände, die durch den Attraktor eindeutig (...) charakterisiert ist. Der semantische Bereich eines Teilsystems ist dann durch das Bassin eines Attraktors definiert, dessen Transienten für die Realisierung eines adäquaten Verhaltens alle die gleiche Bedeutung besitzen.“

1363 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.23.

1364 S. z.B. Fr. PASEMANN: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 74-80, v.a. S. 75: „Mit dem Begriff ‚autotrop‘ wollen wir die spezifische Fähigkeit eines Systems bezeichnen, seinen Selbstorganisationsprozeß mit Hilfe dieser inneren Flexibilität an die sich ständig verändernden Randbedingungen zielgerichtet anzupassen. Selbstorganisation in autotropen neuronalen Systemen beruht also nicht auf der durch eine eindeutig festgelegte Wechselwirkung der Elemente hervorgerufenen Reaktion des Systems auf eine vorgegebene externe Randbedingung, sondern insbesondere auf den vielfältigen Möglichkeiten zur Beeinflussung ‚innerer‘ Parameter seiner Elemente, die wiederum über ihre jeweiligen dynamischen Eigenschaften die Stärke der Wechselwirkungen (Synapsenstärken) bestimmen.“

1365 S. z.B. Fr. PASEMANN: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 80-86, v.a. S. 83.

1366 S. z.B. G. ROTH: Kognition: Die Entstehung von Bedeutung im Gehirn. In: W. KROHN / G. KÜPERS (Hrsg.): Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung. Suhrkamp Verl. Frankfurt. 1992 – G. ROTH: Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Suhrkamp Verl. Frankfurt. 1994.

kann ein situiertes System (...) nur für und aus sich selbst heraus schaffen (...). Dies ist der wesentliche Beitrag, den der reflexive, situierte Selbstorganisationsprozeß zu leisten hat, (...) den man Adaptation (...) nennt.“ Das klassische Konzept einer statischen Repräsentation kann demnach kaum aufrechterhalten werden, da eine Repräsentation „vielmehr als etwas Flüchtiges zu sehen ist“ und ein „Ausdruck einer Kohärenz zwischen internen neurodynamischen Prozessen und der Dynamik der äußeren Umwelt ist, die sich in den Veränderungen der Rezeptoraktivitäten widerspiegelt.“ Desweiteren kann ein und dasselbe Neuromodul als Strukturelement, zum einen, aufgrund seiner Multifunktionalität bei verschiedenen sensorischen Informationen unterschiedliche Funktionen erfüllen, und, zum anderen, kann ein und dieselbe Funktion von sehr unterschiedlichen Strukturelementen erfüllt werden: „Damit verliert aber Repräsentation das Charakteristikum, an spezifische statische Strukturelemente gebunden zu sein und eine strukturelle systemintrinsic Bedeutung zu besitzen. (...) Wenn eine Repräsentation als semantische Konfiguration in einem kognitiven Prozeß aufscheint, dann ist davon auszugehen, daß sie nie als distinkte, immer gleiche Teildynamik zu identifizieren ist. Sie wird als Transientendynamik in der Form eines immer wieder anderen dynamischen Prozesses ihre Funktion erfüllen.“

5.2.05 PLATONIC MODEL UND FEATURE SPACE MAPPING NETWORK NACH W. DUCH¹³⁶⁷

5.2.05.1 Das auch als sog. „Platonisches Modell (des Geistes)“ (engl. “Platonic model (of mind)”) ¹³⁶⁸ benannte neurodynamische Attraktormodell des polnischen Physikers Wlodzislaw DUCH¹³⁶⁹ spannt ebenfalls einen „geistigen Raum“ (engl. “the mind space”) ¹³⁷⁰ i.S. einer vektoriiellen Distanzmetrik auf, der in Form einer Hierarchie aus gestaffelten „Eigenschaftsräumen“ (engl. “feature spaces”), die einfach(-er-)e Modalitäten repräsentieren, konstruiert ist, wobei – in Anlehnung an M. ABELES¹³⁷¹, W. FREEMAN¹³⁷², St. GROSSBERG¹³⁷³, J.L. ELMAN¹³⁷⁴, D.J. AMIT¹³⁷⁵, A. PELLIONISZ & R. LLINÁS¹³⁷⁶ und R.D. TRAUB et al.¹³⁷⁷ – mentale Konzepte und Prozesse als idealisierte quasistabile Systemzustände im Rahmen der Neurodynamik in diesen (neuro-)psychologischen Räumen modelliert werden, die anhand der 40 Hz Synchronisations-

1367 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des Kapitels 6.444 meiner Magisterarbeit: H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009.

1368 Grundlegend s. z.B. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. PP. 491-512, v.a. PP. 496-97: “A model describing the stream of mind events – recognition of objects, categorizations, trains of thought, intuitive decisions and logical reasonings – is needed to place cognitive science on solid grounds. (...) It is called ‘the Platonic model’ since it treats the space in which mind events take place seriously and represents concepts as idealized objects in this space. However, in contrast to what Plato believed in, the content of our minds is just a shadow of neurodynamics taking place in the brain, rather than being a shadow of some ideal world.”

Eingehend s. z.B. W. DUCH: Computational Physics of the Mind. Computer Physics Communication. Vol. 97. 1996. PP. 136-53 – W. DUCH: A Solution to the Fundamental Problems of Cognitive Sciences. UMK - KMK - TR 1/94 Report (1994). From: ftp.phys.uni.torun.pl/pub/papers/kmk.

1369 Zur Person Wlodzislaw DUCH's siehe die Website <http://www.is.umk.pl/~ Duch/>.

1370 S. z.B. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. P. 7.

1371 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.

1372 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.01.

1373 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.

1374 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1375 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.06.

1376 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.14.01.

1377 S. z.B. R.D. TRAUB / M.A. WHITTINGTON / I.M. STANFORD / J.G.R. JEFFERYS: A Mechanism for Generation of Long-Range Synchronous Fast Oscillations in the Cortex. Nature. Vol. 382. 1996. PP. 621-24.

hypothese integriert werden.¹³⁷⁸ Damit besitzt man nach W. DUCH¹³⁷⁹ ein Modell, “[which] has a great potential to bridge the gap between neuroscience and psychology”¹³⁸⁰, indem man z.B. mit T. YANARU, T. HIROTJA und N. KIMURA¹³⁸¹ über die Repräsentation der Kategorisierung von kognitiven Konzepten in der kognitiven Psychologie hinaus z.B. sogar versucht – im Ansatz – Emotionen bzw. eine emotionale Dynamik in einem dementsprechenden „Gefühlsraum“ (engl. “emotional space”)¹³⁸² zu repräsentieren.

5.2.05.2 Eine Implementation der statischen Version des „Platonischen Modells“ wird im sog. “Feature Space Mapping (FSM) Network” vorgenommen¹³⁸³, ein universales adaptives Neurofuzzy-System, basierend auf GAUSS-

-
- 1378 S. z.B. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. PP. 2-6 – W. DUCH: Brain-Inspired Conscious Computing Architecture. Journal of Mind and Behavior. Vol. 26. 2005. PP. 2-7, v.a. PP. 4-5 – W. DUCH: Computational Physics of the Mind. Computer Physics Communication. Vol. 97. 1996. P. 147 – W. DUCH: Neurodynamics and the Mind. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2011), San Jose/ CA. IEEE Press. 2011. PP. 3231-32.
- 1379 S. z.B. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. P. 510.
- 1380 S. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. PP. 491-512.
- 1381 S. z.B. T. YANARU / T. HIROTJA / N. KIMURA: An Emotion-Processing System Based on Fuzzy Inference and its Subjective Observations. International Journal of Approximate Reasoning. Vol. 10. 1994. PP. 99-122.
- 1382 S. W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. P. 503
- 1383 S. z.B. eingehend W. DUCH / G.H.F. DIERCKSEN: Feature Space Mapping as a Universal Adaptive System. Computer Physics Communications. Vol. 87. 1995. PP. 341-71, v.a. PP. 348-59 – W. DUCH: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1998. PP. 13-15, v.a. P. 15: “(...) FSM is an ontogenic density network realization of the static part of the Platonic model. It creates mind objects using training data and laws constraining possible values of inputs. It enables symbolic interpretation of the objects represented by densities in feature spaces. Initialization is based on clusterization, associations are based either on the distance between mind objects (between local maxima) or on the overlaps of the densities representing mind objects. Learning is done by a combination of supervised and unsupervised techniques, adding and removing nodes of the network. Generalization is controlled by the adaptive parameters such as dispersions and by the degree of complexity of the FSM network. Implementation of typical expert system production rules is straightforward. Memory-based reasoning and input completion tasks are easily solved by identifying the relevant nodes and focusing on a single unknown variable each time. Formation of categories and metaconcepts for groups of objects is possible by investigating their projections on various subspaces. In input completion problems a projection of mind objects on a subspace of known inputs is made. Separable functions allow to drop the unknown factors and quickly find the relevant nodes selecting the most active ones. FSM may also answer questions of the type: find all objects similar to X and evaluate their simila-

Funktionen (engl. "Gaussian functions") im Rahmen eines Ansatzes i.S. der sog. „Radiale-Basisfunktionen-Netzwerke“ (engl. "Radial Basis Function (RBF) Networks")¹³⁸⁴.

5.2.05.3 Desweiteren wird von Kr. DOBOSZ und W. DUCH eine Methode, bezeichnet als sog. "Fuzzy Symbolic Dynamics (FSD)"¹³⁸⁵, entwickelt, um ein multidimensionales neurodynamisches Systemverhalten, z.B. ein globales, n-dimensionales EEG-Signal, zu analysieren, indem eine Fuzzy-Partitionierung des Signalraums vorgenommen wird, sodaß die globale Systemtrajektorie nichtlinear abgebildet werden kann auf einen niedrig-dimensionalen (psychologischen) Systemzustandsraum in Form einer geringen Anzahl von sog. "Gaussian fuzzy membership functions".¹³⁸⁶

riety. This network has been applied to a number of classification problems, logical rule extraction, task completion problems and logical reasoning problems (...) with very good results."

S. z.B. einführend W. DUCH: Computational Physics of the Mind. Computer Physics Communication. Vol. 97. 1996. P. 14 – W. DUCH: A Solution to the Fundamental Problems of Cognitive Sciences. UMK - KMK - TR 1/94 Report. 1994. PP. 6-7.

1384 Unter einem sog. „Radiale-Basisfunktionen-Netzwerk“ (engl. "Radial Basis Function (RBF) Network") versteht man dabei ein vorwärtsgerichtetes künstliches neuronales Netzwerk mit einer Schicht von verdeckten Neuronen, die über eine spezielle, radialsymmetrische Aktivierungsfunktion verfügen gemäß

$$f_{act}(X) = \sum_{i=1}^N W_i \cdot h_i(\|X - X_i\|), \quad (130)$$

wobei $h_i(\|X - X_i\|)$ die sog. „radialen Basisfunktionen“ (engl. "radial basis functions") darstellen, die als Eingabe die euklidische Distanz des Vektors X vom (Stützstellen-)Vektor X_i erhalten, und W_i die Synapsen- bzw. Gewichtsvektoren der Neuronen der verdeckten Schicht.

S. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 225-40, v.a. S. 227.

1385 S. z.B. K. DOBOSZ / W. DUCH: Understanding Neurodynamical Systems via Fuzzy Symbolic Dynamics. Neural Networks. Vol. 23. 2010. PP. 487-96, v.a. PP. 488-89 – W. DUCH / K. DOBOSZ: Visualization for Understanding of Neurodynamical Systems. Cognitive Neurodynamics. Vol. 5. 2011. PP. 145-60, v.a. PP. 145-46, 150-53.

1386 S. z.B. K. DOBOSZ / W. DUCH: Understanding Neurodynamical Systems via Fuzzy Symbolic Dynamics. Neural Networks. Vol. 23. 2010. PP. 487-88: "The Fuzzy Symbolic Dynamics (FSD) (...) is based on a few membership functions rather than a large set of symbols. To see the trajectory (...) of the whole system, localized membership functions, or 'probes' that are activated by the trajectories that pass near their center, are placed in the signal space. Using k such membership functions (...) strategically placed in important points of the signal space, a nonlinear reduction of dimensionality suitable for visualization of trajectories is achieved. Inevitably a lot of details will be lost but with a proper choice of parameters the information that correlates with observed behavior or an experimental task may be preserved, while irrelevant information will be suppressed.

A long-term goal of this research is to find the brain-mind transformation that maps the trajectory representing measured neural activity to the psychological space with dimensions that represent perceptions, intentions and other inner events that are part of our mental life."

5.2.06 ATTRACTOR NEURAL NETWORKS MODEL NACH D.J. AMIT

5.2.06.1 Als einer der Begründer der modernen Neuroinformatik identifiziert der israelische Physiker Daniel J. AMIT¹³⁸⁷ bereits in den achtziger Jahren des 20. Jhdts mit seinem sog. "Attractor Neural Networks (ANN) Model"¹³⁸⁸ ein gespeichertes (Aktivitäts-)Muster in einem künstlichen neuronalen Netzwerk mit dem mathematischen Konzept des Attraktors¹³⁸⁹ im Rahmen von synchronen und asynchronen (Netzwerk-)Dynamiken¹³⁹⁰, angeregt u.a. durch seinen U.S.-amerikanischen Kollegen J.J. HOPFIELD¹³⁹¹ mit dessen gleichnamigem rekurrenten Netzwerk, hergeleitet anhand von magnetischen sog. „Spin-Glas“ (engl. "spin glass") Systemen.

5.2.06.2 Indem grundsätzliche Erkenntnisse in Bezug auf das im Ferromagnetismus bei Kristallen angewandte sog. „ISING¹³⁹²-Modell“¹³⁹³, einem der meist untersuchten Modelle in der modernen statistischen Physik, auf rekurrente neuronale Netzwerke übertragen werden, v.a. was das kooperative Systemverhalten einer hohen Anzahl von miteinander wechselwirkenden Systemelementen betrifft, wird ein assoziativer inhaltsadressierbarer Gedächtnisspeicher (engl. "associative content addressable memory") mit den dazugehörigen Mechanismen, wie z.B. des Abrufs (engl. "retrieval"), der (Klassen-)Einteilung (engl. "classification") und der Fehlerberichtigung (engl. "error correction") von neuronaler Information im Rahmen einer (Attraktor-)Landschaftsmetapher interpretiert¹³⁹⁴, wobei die (Punkt-)Attraktoren als sog. „metastabile (System-)Zustände (engl. "metastable (system) states") betrachtet werden¹³⁹⁵ und die sich entwickelnde Netzwerkdynamik anhand einer sog. „Energiefunktion“ (engl. "energy function")¹³⁹⁶ beschrieben werden kann, indem die Methoden und Konzepte der statistischen Mechanik

1387 Zur Person Daniel J. AMIT's siehe die Website <http://www.phys.huji.ac.il/~damita/>.

1388 Grundlegend s. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989.

Einführend s. z.B. D.J. AMIT: Neural Networks, Achievements, Prospects, Difficulties. In: W. GÜTTINGER et al. (Eds.): The Physics of Structure Formation. Theory and Simulation. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1987. PP. 1-27.

1389 S. im einzelnen z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 81-94, 140-41, 178-81, 181-91 und PP. 318-24 – D.J. AMIT: Neural Networks, Achievements, Prospects, Difficulties. In: W. GÜTTINGER et al. (Eds.): The Physics of Structure Formation. Theory and Simulation. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1987. P. 3.

1390 S. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 68-74.

1391 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.03.

1392 Benannt nach dem Mathematiker und Physiker Ernst ISING.

1393 S. hierzu z.B. P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: Neural Network Modeling. Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994. PP. 94-109.

1394 S. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 81-83.

1395 S. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 140-41.

1396 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.23-4.25.

(engl. "statistical mechanics") angewendet werden.¹³⁹⁷

1397 S. z.B. D.J. AMIT: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989. PP. 141-46, 181-91.
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.24.

5.2.07 RECURRENT (ARTICULATED) ATTRACTOR NETWORK MODEL NACH D.C. NOELLE UND G.W. COTTRELL

In den neunziger Jahren des 20. Jhdts. beschäftigten sich die U.S.-amerikanischen (Neuro-)Informatiker David C. NOELLE¹³⁹⁸ und Garrison W. COTTRELL¹³⁹⁹ mit rekurrenten Netzwerkmodellen, basierend auf den sog. "Simple Recurrent Networks (SRN)" J.L. ELMAN's¹⁴⁰⁰, versehen mit sigmoiden Aktivierungsfunktionen, deren Dynamik in systematischer Weise – unter bestimmten Bedingungen – stabile, verteilte Aktivitätsmuster erzeugen, sog. „artikulierte Attraktoren“ (engl. "articulated attractors")¹⁴⁰¹ in einem Attraktorphasenraum, d.h. Attraktorbassins, die durch die kompositionale Interaktion von explizit trainierten Attraktoren entstehen, und die systematische Regularitäten von wohlgeformten Repräsentationen erlernen, sodaß sie neue, bedeutungsvolle Aktivierungsmuster enkodieren und das (System-)Verhalten von anderen Netzwerken modulieren können.

1398 Zur Person David C. NOELLE's siehe die Website <http://www.ucmerced.edu/faculty/directory/david-c-noelle>.

1399 Zur Person Garrison W. COTTRELL's siehe die Website <http://cseweb.ucsd.edu/~gary/>.

1400 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.25.02.

1401 Grundlegend s. z.B. D.C. NOELLE / G.W. COTTRELL: A Connectionist Model of Instruction Following. In: Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society, July 22-25, 1995. University of Pittsburgh. 1995. PP. 369-74 – D.C. NOELLE / G.W. COTTRELL: In Search of Articulated Attractors. In: G.W. COTTRELL (Ed.): Proceedings of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society, July 12-15, 1996. University of California. San Diego. Lawrence Erlbaum, Mahwah/NJ. 1996. PP. 329-34 – D.C. NOELLE / G.W. COTTRELL / Fr.R. WILMS: Extreme Attraction: The Benefits of Corner Attractors. Technical Report CS97-536, Department of Computer Science & Engineering, UCSD. 1997. PP. 1-27.

S. auch z.B. F.-Sh. TSUNG / G.W. COTTRELL: Phase Space Learning for Recurrent Networks. Technical Report CS93-285. Dept. of Computer Science & Engineering, University of California. San Diego. 1993 – F.-Sh. TSUNG / G.W. COTTRELL: Hopf Bifurcation and Hopf Hopping in Recurrent Nets. IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco/CA. Vol. 1. 1993. PP. 39-45. Einführend s. z.B. G.W. COTTRELL: Computational Cognitive Neuroscience (CNNBook). Wiki Textbook. 2011. v.a. Chap. 3: Networks. 3. Bidirectional Excitatory Dynamics and Attractors.

5.3 SYSTEMATISCHE KLASSE DER OSZILLATOR-BASIERTEN ARCHITEKTURTYPEN

5.30 Die systematische Klasse der Oszillator-basierten Architekturtypen gründet sich auf ein Modell eines neuronalen Oszillators, der eine Instanz eines allgemeineren (mathematischen) Konzepts des sog. „(nichtlinearen Relaxations-)Oszillators“ (engl. “(nonlinear relaxation) oscillator”)¹⁴⁰² darstellt, der eine große Klasse von nichtlinearen dynamischen Systemen¹⁴⁰³ repräsentiert, die in einer Vielzahl von physikalischen und biologischen Systemen auftreten. Ein solcher, eine selbsterregende Schwingung (engl. “self-sustained oscillation”)¹⁴⁰⁴ zeigende Oszillator, der auf eine Untersuchung zur Triodenschaltung B. van der POL's¹⁴⁰⁵ im Jahr 1926 zurückgeht, ist dadurch gekennzeichnet, daß er zwei Zeitphasen aufweist, u.z. eine langsame Zeitphase, die für das Aufladen des Kondensators benötigt wird, und eine schnelle Zeitphase für dessen schnelle, plötzliche Entladung, wobei die Periode der Oszillation proportional zur Relaxationszeit ist, die zur Aufladung des Kondensators notwendig ist, woher der Name des Modells stammt.¹⁴⁰⁶ Die allgemeine mathematische Form dieses Oszillatormodells, die die neurale Aktivität in Form einer gepulsten Sequenz von Aktionspotentialen adäquat modelliert, kann man nun angeben anhand des folgenden Differentialgleichungssystems¹⁴⁰⁷:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) + I \quad (131)$$

-
- 1402 Einführend s. z.B. A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 41-44, 72-76, 232-35 – G. BUZSÁKI: Rhythms of the Brain. Oxford University Press. Oxford, New York. 2006. PP. 137-42.
- 1403 Einführend zur mathematischen Analyse des Oszillators s. z.B. H.K. KHALIL: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002. PP. 54-59.
Eine eingehende theoretische Analyse der oszillatorischen Dynamik und der damit einhergehenden Synchronisationsmechanismen der neuronalen Aktivität findet man in A.K. STURM / P. KÖNIG: Mechanisms to Synchronize Neuronal Activity. Biological Cybernetics. Vol. 84. 2001. PP. 153-72.
- 1404 Einführend s. z.B. A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 27-44.
- 1405 S. z.B. B. van der POL: On Relaxation Oscillation. Philosophical Magazine. Vol. 2. 1926. PP. 978-92.
Einführend s. z.B. Kl. BURG / H. HAF / Fr. WILLE / A. MEISTER: Höhere Mathematik für Ingenieure. Band III: Gewöhnliche Differentialgleichungen, Distributionen, Integraltransformationen. 5. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2009. S. 131-36.
S. auch R. FITZHUGH: Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane. Biophysical Journal. Vol. 1. 1961. PP. 445-66.
- 1406 Man spricht deshalb auch von einem sog. “accumulate-and-fire oscillator” oder von einem sog. “integrate-and-fire oscillator”, der ein angemessenes Modell eines sog. “integrate-and-fire neuron” darstellt.
S. hierzu z.B. A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 41-42.
- 1407 Grundlegend s. z.B. B. van der POL: On Relaxation Oscillation. Philosophical Magazine. Vol. 2. 1926. PP. 978-92, v.a. P. 978 – R. FITZHUGH: Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane. Biophysical Journal. Vol. 1. 1961. PP. 445-66, v.a. P. 447.
Einführend s. z.B. A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. P. 621.

$$\frac{dy}{dt} = \epsilon g(x, y), \quad (132)$$

wobei I die Eingabe des Oszillators ist, den dieser vom Stimulus erhält, ϵ einen Parameter und x, y zwei Zustandsvariablen, wobei die erstere die schnelle Zeitphase beschreibt, während letztere die langsame Zeitphase beschreibt.

Das sog. "WILSON-COWAN Network Oscillator Model", entwickelt von H.R. WILSON und J.D. COWAN¹⁴⁰⁸ im Jahr 1972, simuliert nun neuronale Oszillationen von kortikalen Neuronen anhand des folgenden Systems von gekoppelten Differentialgleichungen, die die Aktionspotentialaktivität in Form der durchschnittlichen Feuerrate zwischen zwei (Sub-)Populationen von exzitatorischen Neuronen x und inhibitorischen Neuronen y , die über rekurrente (Rückkopplungs-)Verbindungen verschaltet sind, im Rahmen einer neuralen (Gesamt-)Population modelliert¹⁴⁰⁹:

$$\tau_x \frac{dx_i}{dt} = -x_i - g_y(y_i) + J_0 g_x(x_i) + \sum_j J_{ij} g_x(x_j) + h_i + \eta_x \quad (133)$$

$$\tau_y \frac{dy_i}{dt} = -y_i + g_x(x_i) - \sum_j W_{ij} g_y(y_j) + \eta_y, \quad (134)$$

wobei in diesen Gleichungen die Zeitkonstante τ angepaßt werden kann, um die Oszillationsfrequenz an die physiologischen Datenwerte anzugleichen, die Transferfunktion $g_y(y_i)$ bzw. $g_x(x_i)$ der Aktivierung der betreffenden Zellpopulation einen Ausgabewert zuweist, J_0 bezeichnet eine Selbsterregung, um stabile grenzyklische Oszillationen zu erhalten, die Summenterme bezeichnen jeweils die Eingabe, die die betreffende exzitatorische (inhibitorische) Population von den anderen exzitatorischen (inhibitorischen) Populationen erhält, h_i ist die Eingabe, die der betreffende Oszillator vom Stimulus erhält, der Term η_x bzw. η_y , der das Rauschen bezeichnet, modelliert die Variabilität in der neuronalen Aktivität, sodaß – insgesamt betrachtet – die Kopplung von Oszillatoren in der (Sub-)Population von exzitatorischen (inhibitorischen) Neuronen einen (De-)Synchronisationseffekt der Oszillationen¹⁴¹⁰ zur Folge hat.

1408 S. H.R. WILSON / J.D. COWAN: Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. Biophysical Journal. Vol. 12. 1972. PP. 1-24.

Einführend s. z.B. G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010. PP. 344-60 – H.R. WILSON: Spikes, Decisions, and Actions: The Dynamical Foundations of Neuroscience. Oxford University Press. New York. 1999. PP. 120-23.

1409 S. z.B. H.R. WILSON / J.D. COWAN: Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons. Biophysical Journal. Vol. 12. 1972. PP. 1-24, v.a. P. 3 und PP. 7, 8, 10 mit den Formeln (3)(4), (7)(8) und (11)(12).

Einführend s. z.B. A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 622-23.

1410 Eingehend zum Thema der Synchronisation bei Oszillationen s. z.B. N. KOPELL: We Got Rhythm: Dynamical Systems of the Nervous System. Notices of the American Mathematical Society. Vol. 47. 2000. PP. 6-16.

Einführend hierzu s. z.B. G. BUZSÁKI: Rhythms of the Brain. Oxford University Press. Oxford, New

Ein dazu vereinfachtes Modell, das nur anhand der (Phasen-)Variable ϕ beschrieben wird, stellt das sog. „phasengekoppelte Oszillatormodell“ (engl. “phase-coupled oscillator model”)¹⁴¹¹ dar, das in allgemeiner mathematischer Form wie folgt angegeben werden kann¹⁴¹²:

$$x_i = a_i \sin(\phi_i) \quad (135)$$

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \omega + f(\phi_i, \phi_j), \quad (136)$$

wobei a die Amplitude der Oszillation bezeichnet, ω die Grundfrequenz des ungekoppelten Oszillators, und die Kopplungsfunktion (engl. “coupling function”) f modelliert den Effekt der Phase eines gekoppelten Oszillators j auf die Phase des Oszillators i , wobei die Funktion f für gewöhnlich definiert wird mit

$$f(\phi_i, \phi_j) = -\sin(\phi_i - \phi_j). \quad (137)$$

5.31 Im vorliegenden Kapitel werden nun im Folgenden stellvertretend zwei Modellkonzeptionen von oszillatorischen künstlichen neuronalen Netzwerken behandelt, die das Bindungsproblem¹⁴¹³ in Form des Problems der sog. „Merkmalsbindung“ (engl. “feature binding”)¹⁴¹⁴ anhand eines integrativen Synchronisationsmechanismus¹⁴¹⁵ in sehr überzeugender Weise modellieren (Kap. 5.3.01, 5.3.02), und darauf aufbauend eine sog. „(Neuro-)Emulative Semantik“ (engl. “(neuro-)emulative semantics”) entwickeln (Kap. 5.3.01).

5.32 Daneben gibt es eine Klasse von oszillatorischen Netzwerken, bestehend aus gekoppelten Oszillatoren, die unter der Rubrik der sog. “Visual Image (Scene) Segmentation Analysis”¹⁴¹⁶ zusammengefaßt wird, auf die in der vorliegenden Arbeit aber nicht näher eingegangen werden kann.

5.33 Desweiteren untersuchen eine Vielzahl von Forschungsgruppen in der komputationalen Neurowissenschaft Synchronisationsphänomene anhand von künstlichen Netzwerken mit (gekoppelten) neuronalen Oszillatoren (engl.

York. 2006. PP. 136-74.

1411 Einführend s. z.B. A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001. PP. 222-35.

1412 S. z.B. H. SCHUSTER / P. WAGNER: A Model for Neuronal Oscillations in the Visual Cortex. Biological Cybernetics. Vol. 64. 1990. PP. 77-82.

Einführend s. z.B. A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 623-24.

1413 Allgemein hierzu s. z.B. J. PETITOT: Cognitive Morphodynamics. Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011.

1414 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3, Fn. 542.

1415 Eine allgemeine Einführung in die Synchronisationsmechanismen von Oszillatoren bietet z.B. G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010. PP. 241-84 – A. PIKOVSKY / M. ROSENBLUM / J. KURTHS: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001.

1416 Einen allgemeinen Überblick hierzu bietet z.B. D.L. WANG: Visual Scene Segmentation. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1215-19 – B. ERMENTROUT: An Introduction to Neural Oscillators. In: Fr. VENTRIGLIA (Ed.): Neural Modeling and Neural Networks. Pergamon Press. Oxford u.a. 1994. PP. 79-110.

“coupled neural oscillators”)¹⁴¹⁷, z.B. B. ERMENTROUT und N. KOPELL¹⁴¹⁸, D. SOMERS und N. KOPELL¹⁴¹⁹ und P. GOEL und B. ERMENTROUT¹⁴²⁰, worauf in der vorliegenden Arbeit aber nicht näher eingegangen werden kann.

-
- 1417 Eine Übersicht hierüber bietet z.B. B. ERMENTROUT: An Introduction to Neural Oscillators. In: Fr. VENTRIGLIA (Ed.): Neural Modeling and Neural Networks. Pergamon Press. Oxford u.a. 1994. PP. 79-110 – B. ERMENTROUT: Neural Networks as Spatio-Temporal Pattern-Forming Systems. Reports on Progress in Physics. Vol. 61. 1998. PP. 353-430, v.a. PP. 374-77 – G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010. PP. 171-240.
- 1418 S. z.B. B. ERMENTROUT / N. KOPELL: Frequency Plateaus in a Chain of Weakly Coupled Oscillators. I. Siam Journal on Mathematical Analysis. Vol. 15. 1984. PP. 215-37 – N. KOPELL / B. ERMENTROUT: Symmetry and Phaselocking in Chains of Weakly Coupled Oscillators. Communications on Pure and Applied Mathematics. Vol. 39. 1986. PP. 623-60.
- 1419 S. z.B. D. SOMERS / N. KOPELL: Rapid Synchronization through Fast Treshold Modulation. Biological Cybernetics. Vol. 68. 1993. PP. 393-407 – D. SOMERS / N. KOPELL: Waves and Synchrony in Networks of Oscillators of Relaxation and Non-Relaxation Type. Physica D: Nonlinear Phenomena. Vol. 89. 1995. PP. 169-83 – N. KOPELL: We Got Rhythm: Dynamical Systems of the Nervous System. Notices of the American Mathematical Society. Vol. 47. 2000. PP. 6-16.
- 1420 S. z.B. P. GOEL / B. ERMENTROUT: Synchrony, Stability, and Firing Patterns in Pulse-Coupled Oscillators. Physica D. Vol. 163. 2002. PP. 191-216.

5.3.01 OSCILLATORY NETWORKS NACH M. WERNING

5.3.01.0 PROBLEM DER SEMANTISCHEN KOMPOSITIONALITÄT

Nach dem Wissenschaftstheoretiker und (Neuro-)Philosophen Markus WERNING^{1421,1422} wird das Problem der (semantischen) Kompositionalität¹⁴²³ in Anknüpfung an G. FREGE¹⁴²⁴, d.h. die semantischen Werte von komplexen syntaktischen Termen sind bestimmt und hängen damit ab – in Form einer syntaxabhängigen Funktion – von den semantischen Werten der elementaren Terme, weder von den klassischen symbolistischen Modellen, z.B. dem von J. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁴²⁵, noch von den konnektionistischen Modellen, z.B. dem von P. SMOLENSKY¹⁴²⁶, überzeugend gelöst, denn dessen Strategie syntaktische Kompositionalität in seiner sog. "Integrated Connectionist / Symbolic (ICS) Cognitive Architecture"¹⁴²⁷ zu erzeugen, indem die Syntax einer systematischen Sprache homomorph¹⁴²⁸ auf eine Algebra von Vektoren und Tensoroperationen abgebildet wird, ist nicht hin-

1421 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1094-99.

S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 261-78.

1422 Zur Person Markus WERNING's siehe die Website <http://www.ruhr-uni-bochum.de/phil-lang/>.

1423 Zur Kompositionalitätsproblematik s. z.B. M. WERNING: How to Compose Contents. A Review of Jerry Fodor's *In Critical Consition: Polemic Essays on Cognitive Science and the Philosophy of Mind*. Psyche. Vol. 8. 2002. PP. 1-9 – M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 285-309 – M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. PP. 145-78.

1424 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.3 Fn. 1451, 1452.

1425 S. z.B. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 4-50.

Siehe hierzu die Ausführungen zur Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte in Kap. 5.1.01.1.

1426 S. z.B. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 63-95, 100-119, 145-390 und P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 473-98, 503-90 – P. SMOLENSKY: Connectionism, Constituency, and the Language of Thought. In: B. LOEWER / G. REY (Eds.): Meaning in Mind. Fodor and his Critics. Blackwell. Cambridge/MA, Oxford/UK. 1991. PP. 201-27.

Siehe hierzu die Ausführungen zur Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte in Kap. 5.1.01.1 und 5.1.01.3.

Zur Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik s. z.B. H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. S. 35-106.

1427 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.

1428 Zum Begriff des Homomorphismus s. z.B. M.P.H. WOLFF / P. HAUCK / W. KÜCHLIN: Mathematik für Informatik und BioInformatik. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. S. 92-93.

reichend, um Systematizität zu erreichen, sondern man benötigt dazu eben eine Form von semantischer Kompositionalität.¹⁴²⁹

Die überwiegende Mehrzahl der Semantiktheorien erklären nach M. WERNING¹⁴³⁰ die semantischen Eigenschaften von internen Repräsentationen entweder im Sinne der Kovarianz, im Sinne von Inferenzrelationen, oder im Sinne der Assoziation, sodaß die Frage, wie die semantischen Werte von elementaren Repräsentationen die semantischen Werte von komplexen Repräsentationen determinieren, auf die Frage zurückgeführt werden kann, wie dabei die kausalen Eigenschaften weitergegeben werden können, was zum Begriff der sog. „(Partikel-)Konstituente“ i.S. der Physik und Chemie führt: Dies erfordert, daß die kausalen Eigenschaften eines zusammengesetzten Zustandes B bestimmt und abhängig sind, u.z. notwendig und allgemein, von den kausalen Eigenschaften der einfachen Zustände A_1, \dots, A_n und von ihren Beziehungen zueinander, sodaß dadurch die Zustände A_1, \dots, A_n als die Konstituenten des Zustandes B aufgefaßt werden.

Das Versagen der konnektionistischen Modelle in Bezug auf die Kompositionalitätsproblematik ist daher darauf zurückzuführen, daß der Homomorphismus zwischen der abzubildenden systematischen Sprache und der Struktur des betreffenden Netzwerks eben nicht diese geforderten kausalen Konstituentenrelationen bewahren kann.

5.3.01.1 ARCHITEKTUR EINES OSZILLATORISCHEN NETZWERKS

Der Bezug auf diachrone Kausalrelationen im Rahmen eines Aktivierungsflusses in einem künstlichen neuronalen Netzwerk reicht daher nicht aus um Konstituentenrelationen zu begründen, sondern es bedarf einer synchronen Relation, u.z. der Synchronizitätsrelation zwischen den Phasen von neuronaler Aktivität, die definiert werden kann anhand eines sog. „Oszillatorischen Netzwerks“ (engl. “Oscillatory Network”)¹⁴³¹, dessen Architektur nun kurz beschrieben wird¹⁴³²: Ein elementarer Oszillator, der ein Modell ei-

1429 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1094.

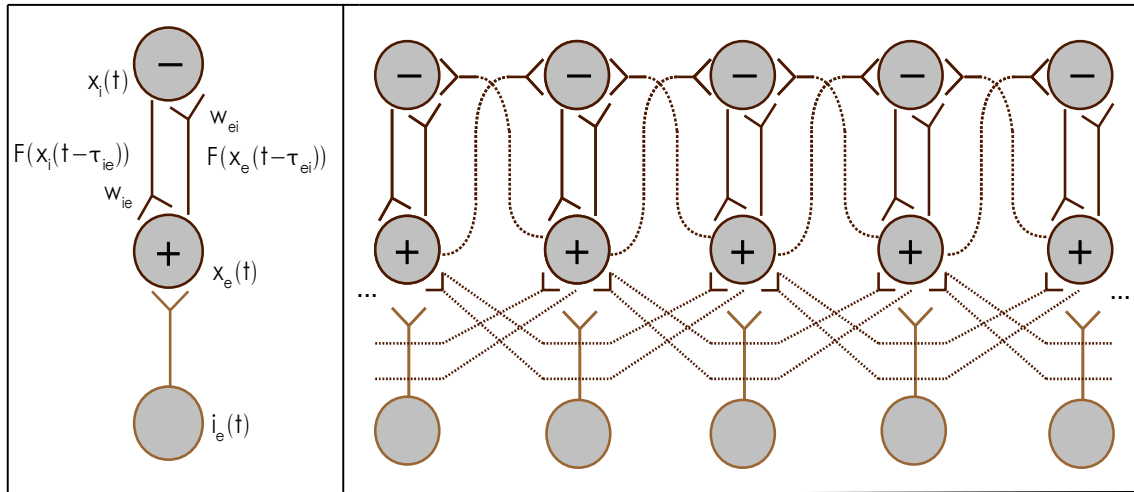
1430 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1095.

1431 Siehe hierzu auch die Ausführungen zum sog. “Self-Organizing Neuronal Oscillator Model” nach P. KÖNIG und Th.B. SCHILLEN in Kap. 5.3.02, auf das sich M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1096 bezieht.

1432 Einführend zur Architektur eines Oszillatorischen Netzwerks s. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1096.

Eingehend hierzu s. z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 288-90 – A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dy-

nes Verbandes von Neuronen darstellt¹⁴³³, wird realisiert, indem man eine exzitatorische Einheit (engl. "excitatory unit") mit einer inhibitorischen Einheit (engl. "inhibitory unit") über Verzögerungsverbindungen (engl. "delay connections") koppelt, und eine zusätzliche Einheit voranschaltet, über die der Stimulus eingegeben werden kann (s. Graphik.44.1).



Graphik.44.1: Schematisches Diagramm eines elementaren Oszillators, bestehend aus einem gekoppelten Paar einer exzitatorischen (+) und einer inhibitorischen Einheit (-), zusammen mit einer Eingabeeinheit: t , Zeit; $x(t)$, Aktivitätseinheit; $F(x)$, sigmoidale Ausgabe-funktion; w , Kopplungsgewichtung; τ , Verzögerungszeit; $i_e(t)$, Stimuluseingabe. Indizes: e , exzitatorische Einheit; i , inhibitorische Einheit (s. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1095).

Graphik.44.2: Schematisches Diagramm eines gekoppelten Oszillators: Oszillatorische Elemente gekoppelt durch kurzreichweitige synchronisierende Verbindungen (gestrichelt) und langreichweitige desynchronisierende Verbindungen (gepunktet), ohne gegenseitige Beeinflussung an den Überkreuzungen (s. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1095).

Das gesamte Netzwerk besteht nun aus nebeneinander geschalteten elementaren Oszillatoren, die sowohl über kurzreichweitige synchronisierende Verbindungen (engl. "short-range synchronizing connections") gekoppelt sind, als auch über langreichweitige desynchronisierende Verbindungen (engl. "long-range desynchronizing connections") (s. Graphik.44.2). Ein mit sensorischen Informationen stimuliertes Oszillatorisches Netzwerk kann daher als ein Eigenschafts-Modul (engl. "feature modul")¹⁴³⁴ angesehen werden, dessen Oszillatoren synchronisieren, die z.B. eine Eigenschaft bzw.

namics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 316-19.

1433 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.3.

1434 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1096.

mehrere Eigenschaften desselben Objekts im betreffenden sog. „rezeptiven Feld“ (engl. “receptive field”)¹⁴³⁵ der Neuronen repräsentieren, währenddessen diejenigen Oszillatoren ihre Aktivität desynchronisieren, die z.B. eine Eigenschaft von verschiedenen Objekten repräsentieren, da sich für jedes repräsentierte Objekt eine bestimmte Phase der Aktivität im Netzwerk ausbreitet, die nur denjenigen Oszillatoren vorbehalten bleibt, die die Eigenschaft(-en) des betreffenden Objekts repräsentieren (s. das Beispiel in der Graphik.46).

5.3.01.2 ALGEBRAISCHE DEFINITION EINES OSZILLATORISCHEN NETZWERKS

Es wird nun von M. WERNING¹⁴³⁶ eine abstrakte algebraische Definition eines Oszillatorischen Netzwerks, bezeichnet als Algebra N , angegeben, die mit einer fundamentalen Operation auskommt, u.z. mit der Operation „ist synchron mit“ (engl. “being synchronous with”) mit dem entsprechenden Operationssymbol “ \approx^N ”, die die Phasen der neuronalen Aktivität zueinander in Beziehung setzt, wobei die elementaren Entitäten der Algebra N

- (1) aus eben diesen Phasen der neuronalen Aktivität mit den Symbolen $\varphi_1^N, \dots, \varphi_m^N$, und
- (2) aus den Mengen von Phasen der Neuronen(-ansammlung) mit den Symbolen F_1^N, \dots, F_n^N bestehen, die eine bestimmte Eigenschaft indiziert bzw. kodiert:

“Oscillatory networks that implement the two hypothesis¹⁴³⁷ can be given an abstract algebraic description:

1435 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.424.01, Fn. 1483.

1436 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1096-97.
S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 263-66.

1437 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1096: “Assuming that elementary oscillators are models of neurons and that oscillatory networks are models of part of the visual cortex, the results of these studies support two hypotheses:
Indicativity. As part of the visual cortex, there are collections of neurons whose function it is to show activity only when an object in the perceptual field instantiates a certain property.
Synchrony. Neurons that belong to two collections indicative for the properties π_1 and π_2 , respectively, have the function to show activity synchronous with each other only if the properties π_1 and π_2 are instantiated by the same object in the perceptual field.
The hypotheses are supported by neurobiological evidence.”

$$N = \langle N_i, N_p, N_s; \varphi_1, \dots, \varphi_m; F_1, \dots, F_n; \approx, \neq, \varepsilon, \wedge \rangle. \text{''}^{1438} \quad (138)$$

Diese Notation der Algebra N ist nun nach M. WERNING¹⁴³⁹ isomorph zu einer kompositionalen und systematischen Sprache, bezeichnet als Algebra L, die im Folgenden kurz dargelegt wird, und ebenso mit einer fundamentalen Operation auskommt, u.z. mit der Operation „ist gleich mit“ (engl. “being the same as”) mit dem entsprechenden Operationsymbol “ \approx^L ”, die die indexikalischen Ausdrücke wie „dies“ und „das“ (engl. “this”, “that”) zueinander in Beziehung setzt, wobei die elementaren Entitäten der Algebra L

- (1) aus eben diesen Indexikalen mit den Symbolen $\varphi_1^L, \dots, \varphi_m^L$, und
- (2) aus den Mengen von Eigenschaften mit den Symbolen F_1^L, \dots, F_n^L bestehen, die den Prädikaten entsprechen:

“Since languages can be treated as algebras, we may define:

$$L = \langle L_i, L_p, L_s; \varphi_1, \dots, \varphi_m; F_1, \dots, F_n; \approx, \neq, \varepsilon, \wedge \rangle. \text{''}^{1440} \quad (139)$$

Zusammenfassend kann man nun mit M. WERNING¹⁴⁴¹ die neuronale Repräsentation einer elementaren Prädikation $F(a)$ wie folgt beschreiben: Sofern man eine Ansammlung von (sensorischen) Neuronen gegeben hat, die denselben Sachverhalt(-szustand) im Wahrnehmungsraum, d.h. im

1438 S. im einzelnen M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1096-97.

S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 263-66.

1439 Damit dies bewiesen werden kann, müssen vier Bedingungen erfüllt sein.

S. hierzu M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1097.

S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 267-68.

1440 S. im einzelnen M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1097.

S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 266-67.

1441 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1097-99.

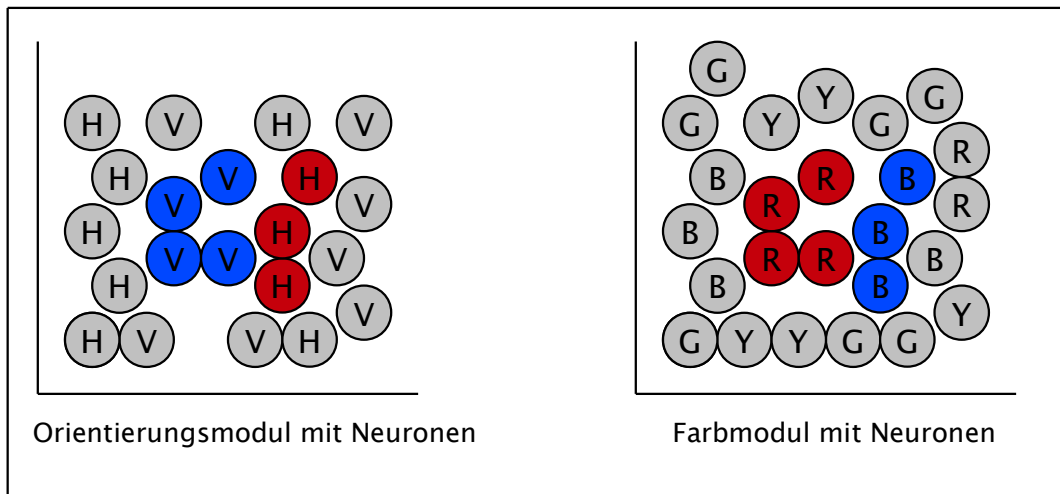
jeweiligen sog. „rezeptiven Feld“ z.B. dieselbe Eigenschaft eines Objektes, anzeigen, kann man sagen, daß, wenn ein Neuron, das dieselbe synchrone Phasenaktivität φ_i^N der Neuronen dieser Ansammlung aufweist, ein Element der (Phasen-)Menge F_j^N dieser Neuronen ist, sodaß dieser neuronale Zustand anhand der Definition der Relation des „Bezugnehmens“ (engl. „pertaining“) ε^N wie folgt dargestellt wird:

$$[\varphi_i \varepsilon F_j]^N \text{ ist der (neuronale) Zustand } [(\exists x)(x \approx \varphi_i \ \& \ x \in F_j)]^N. \quad (140)$$

Dies ist demnach dem Sachverhalt isomorph, wenn man einem indexikalischen Ausdruck φ_i^L über die Definition der Kopula ε^L (englisch: „is“) verbindet mit einem Prädikat F_j^L zu einem Sachverhalt(-szustand), z.B. derselben Eigenschaft eines Objektes, der Form: Dieses Etwas ist zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort des Wahrnehmungsraums, d.h. im jeweiligen sog. „rezeptiven Feld“, eine bestimmte Eigenschaft, was bedeutet, daß diese Synchronizität der Phasenaktivität von Neuronen die Zuschreibung einer Eigenschaft zu einem bestimmten raumzeitlichen Sachverhalt(-szustand) im Wahrnehmungsraum, z.B. einem Objekt, gewährleistet:

$$[\varphi_i \varepsilon F_j]^L \text{ ist die (sprachliche) Klausel } [(\exists x)(x \approx \varphi_i \ \& \ x \in F_j)]^L. \quad (141)$$

Das folgende Beispiel illustriert die neuronale Repräsentation einer komplexen Prädikation (s. Graphik.45):



Graphik.45: Schema einer typischen neuronalen Reaktion, hervorgerufen durch ein blaues vertikales und ein rotes horizontales Objekt: Die Kreise mit Buchstaben stehen als Kurzbezeichnung für Neuronen mit der Eigenschaft, die sie anzeigen: vertikal (engl. „vertical“) (V), horizontal (engl. „horizontal“) (H), rot (engl. „red“) (R), grün (engl. „green“) (G), blau (engl. „blue“) (B) and gelb (engl. „yellow“) (Y). Ähnliche Farbtöne bringen dabei synchrone Aktivitäten zum Ausdruck: Die Phasen einiger Blau-Neurone sind z.B. synchron mit den Phasen einiger Vertikal-Neuronen (blau getönt), und einige Horizontal-Neuronen sind in Synchronizität mit den Phasen von einigen Rot-Neuronen (rot getönt).

Die Abbildung drückt somit den kortikalen Zustand aus: $[\varphi_1 \varepsilon V \wedge \varphi_1 \varepsilon B \wedge \varphi_2 \varepsilon H \wedge \varphi_2 \varepsilon R]^N$, der

dem Satz entspricht: „Dies ist ein blaues vertikales und ein rotes horizontales Objekt“, das wie folgt paraphrasiert werden kann: $[\varphi_1 \varepsilon V \wedge \varphi_1 \varepsilon B \wedge \varphi_2 \varepsilon H \wedge \varphi_2 \varepsilon R]^L$ (angelehnt an M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1096).

Dieser Prozeß einer Prädikation kann nach M. WERNING¹⁴⁴² jedoch nur vorgenommen werden, sofern sowohl die einzelnen Phasenaktivitäten als auch die Ansammlung von Neuronen, denen eine Menge bestehend aus einer bestimmten synchronen Phasenaktivität zugewiesen ist, im Kortex als ein tatsächlicher Einzelzustand (engl. „token“) vorkommen, sodaß die geforderte kausale Konstituentenstruktur einer Sprache gewahrt wird, und somit oszillatorische Netzwerke nicht nur die syntaktische, sondern auch die semantische Kompositionalität gewährleisten.

Desweiteren kann man mit M. WERNING¹⁴⁴³ die neuronale Repräsentation einer zweistelligen Relation $R(a, b)$ wie folgt beschreiben:

“The representation of relations poses a binding problem of second order. (...) The constituency preserving isomorphism between L and N straightforwardly generates a prediction of how to realize relational representation by oscillatory networks: After L has been extended by the tools for representing relations known from logic, N has to be extended in a way that perpetuates the isomorphism and the congruence with respect to constituency structure. The tools needed in the extensions of L and N are the operation of pairing, a higher-order copula and relation constants, or, respectively, their neuronal counterparts. Following Kuratowski (1967)¹⁴⁴⁴, ordered *pairs* are by common standards defined as asymmetric sets of second order:

$$[\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle]^{L/N} =_{\text{def}} [\{\{\varphi_i, \varphi_j\}, \{\varphi_j\}\}]^{L/N}. \quad (142)$$

With the relations R_1^L, \dots, R_k^L being sets of pairs, the higher-order copula links pairs to relations in the manner of set membership. On the neuronal level, the R_1^N, \dots, R_k^N can be interpreted as relational modules:

$$[\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle \varepsilon R_L]^{L/N} =_{\text{def}} [\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle \in R_L]^{L/N}. \quad (143)$$

1442 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1097-98.

1443 S. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1098.

S. auch M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 275-76.

1444 Dabei Bezug nehmend auf K. KURATOWSKI: Set Theory. North Holland. Amsterdam. 1967.

(...) To achieve a distribution of phases thus complex, some neurons are required to show a superposition of two phases."

Zusammenfassend wird also eine neuronale Repräsentation einer Relation dadurch gewährleistet, daß die Kopula höherer Ordnung der Relation i.S. der Algebra L als eine Menge von Paaren aufgefaßt wird, die geordnete Paare von indexikalischen Ausdrücken anhand der Mengenzugehörigkeit zu Relationen verbindet, wobei dies neuronal implementiert werden kann – i.S. der Algebra N – mit einem relationalen (Funktions-)Modul, das geordnete Paare von Phasenaktivitäten anhand der Superposition dieser zwei Phasenaktivitäten zu Relationen verbindet.

5.3.01.3 (NEURO-)EMULATIVE SEMANTIK

5.3.01.30 Das Modell der sog. „Oszillatorischen Netzwerke“ (engl. “oscillatory networks”)¹⁴⁴⁵ mit seinen neurobiologischen Korrelaten in Form von Oszillationsfunktionen und deren Synchronisationen ist nun vom Wissenschaftstheoretiker und (Neuro-)Philosophen Markus WERNING¹⁴⁴⁶, in Zusammenarbeit mit dem (Neuro-)Informatiker Alexander MAYE¹⁴⁴⁷, zu einer sog. „(Neuro-)Emulativen Semantik“ (engl. “(neuro-)emulative semantics”)¹⁴⁴⁸ weiterentwickelt worden, die eine neurobiologisch realistische¹⁴⁴⁹, emulati-

¹⁴⁴⁵ Grundlegend s. z.B. M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Network. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1094-99 – M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 261-78

Eine ausführliche Darstellung des Modells bietet M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 283-312.

Daneben s. auch M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 203-24 – A. MAYE / M. WERNING: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. PP. 941-48 – A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 315-25

¹⁴⁴⁶ S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-54.

¹⁴⁴⁷ Zur Person Alexander MAYE's siehe die Website http://www.uke.de/institute/neurophysiologie/index_4454.php.

¹⁴⁴⁸ S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-34.
S. auch Fn. 1459.

¹⁴⁴⁹ S. z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 286-88 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuro-

ve und kompositionale modelltheoretische Semantik für eine (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung erzeugt, wobei sie in dem Sinn nicht-symbolisch ist, daß sie zwar an dem modernen sog. „Kompositionalitätsprinzip der Bedeutung“ (engl. “Principle: Compositionality of Meaning”) ¹⁴⁵⁰, aber nicht an dem sog. „Prinzip der semantischen Konstituenz“ (engl. “Principle of Semantic Constituency”) ¹⁴⁵¹ festhält. Das Modell zeigt ferner, wie seine neuronalen Strukturelemente in Form von Oszillationsfunktionen als interne

nal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 639-42: Die Architektur der Oszillatorischen Netzwerke gründet sich dabei auf empirische Befunde aus der Neurobiologie, der Neurophysiologie und der Wahrnehmungspsychologie, die die Existenz von topographisch strukturierten kortikalen (Eigenschafts-)Karten, dem neurophysiologischen (Bindungs-)Mechanismus einer objektbezogenen Synchronisation von neuronaler Aktivität und die Gestaltprinzipien der Wahrnehmung i.S.d. sog. „Gestaltpsychologie“ i.S.v. M. WERTHEIMER, W. KÖHLER und K. KOFFKA betreffen.

Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 3.4.

1450 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 634: “Principle 1 (Compositionality of meaning) *The meaning of a complex term is a syntax-dependent function of the meanings of its syntactic parts.*”

S. auch M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 283-85

Entgegen der klassischen Formulierung der Kompositionalität bei G. FREGE: Compound Thoughts. In: P. GEACH / R.H. STOOHOFF (Eds. and Trans.): Logical Investigations. Gottlob Frege. Basil Blackwell. Oxford. 1923/1976. P. 55, der eine Korrespondenzrelation zwischen der Teil/Ganzes-Beziehung im syntaktischen Bereich und der im semantischen Bereich postuliert, hat man nun anzunehmen, daß es sich beim modernen Kompositionalitätsprinzip der Bedeutung (engl. “Compositionality of Meaning”) um einen Homomorphismus zwischen zwei algebraischen Strukturen handelt, u.z. der syntaktischen Struktur der Terme und der semantischen Struktur der Bedeutungen.

Die formale Definition (P. 635) lautet: “Definition 1 (Formal Compositionality) *Given a language with the syntax $\langle T, \Sigma_T \rangle$, a meaning function $\mu: T \rightarrow M$ is called compositional just in case, for every n -ary syntactic operation $\sigma \in \Sigma_T$ and any sequence of terms t_1, \dots, t_n in the domain of σ , there is a partial function m_σ defined on M^n such that*

$$\mu(\sigma(t_1, \dots, t_n)) = m_\sigma(\mu(t_1), \dots, \mu(t_n)).” \quad (144)$$

S. auch Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. P. 450.

1451 In Anknüpfung an die klassische Formulierung der Kompositionalität bei G. FREGE: Compound Thoughts. In: P. GEACH / R.H. STOOHOFF (Eds. and Trans.): Logical Investigations. Gottlob Frege. Basil Blackwell. Oxford. 1923/1976. P. 55 hat man – im Gegensatz zum modernen Kompositionalitätsprinzip der Bedeutung (engl. “Compositionality of Meaning”) – anzunehmen, daß eine Korrespondenzrelation besteht zwischen der Teil/Ganzes-Beziehung im syntaktischen Bereich und der im semantischen Bereich, sodaß man dies als das Prinzip der semantischen Konstituenz (engl. “Semantic Constituency”) umschreiben kann.

S. z.B. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 634: “Principle 2 (Semantic constituency) *There is a semantic part-whole relation on the set of meanings such that for every two terms, if the one is a syntactic part of the other, then the meaning of the former is a*

(„mentale“) Repräsentationen mit externen Gehalten kovariieren, sodaß deutlich wird, wie sie zwischen den Ausdrücken der (Prädikaten-)Sprache und den dadurch bezuggenommenen Gegenständen der Welt, den sog. „Denotationen“ (engl. “denotations”), vermitteln können.¹⁴⁵²

Eine sog. „symbolische Semantik“ (engl. “Symbolic Semantics”)¹⁴⁵³ i.S.d. “Language of Thought“ J. FODOR's wird nunmehr definiert, basierend auf eben diesem Prinzip der semantischen Konstitutivität als einem Grundpfeiler von symbolischen Bedeutungstheorien, deren Teil/Ganzes-Beziehungen z.T. wiedergegeben werden können anhand von sog. “Vector Symbolic Architectures“ i.S. P. SMOLENSKY's¹⁴⁵⁴, aber vor allem i.S. T. PLATE's¹⁴⁵⁵ oder T. STEWARD's & Chr. ELIASMITH's¹⁴⁵⁶, die das Konzept der sog. “circular convolution“ als Bindungsmechanismus verwenden, sodaß über ein sog. “algorithm of unbinding“ der Füllervektor wiederherstellbar wird.

Die neuronale Struktur von Oszillatorischen Netzwerken bietet dagegen eine kompositionale, *nicht*-symbolische Semantik für eine (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung an, d.h., die Elemente der neuronalen Struktur stellen interne mentale Repräsentationen dar, die verlässlich kovariieren¹⁴⁵⁷ mit

semantic part of the meaning of the latter.”

Die formale Definition eines weit gefaßten Begriffs einer Teil/Ganzes-Beziehung (engl. “part-whole relation”) lautet dabei (P. 635): “Definition 2 (Part-whole Relation) A relation \times defined on a set X is called a part-whole relation on X just in case, for all $x, y, z \in X$ the following holds: (...)

(i) $x \times x$ (reflexivity). (145)

(ii) $x \times y \wedge y \times x \rightarrow x = y$ (anti-symmetry). (146)

(iii) $x \times y \wedge y \times z \rightarrow x \times z$ (transitivity).” (147)

S. auch M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 283-85.

S. aber M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. PP. 149-51.

S. auch die Ausführungen in Kap. 6.413- 6.414.

1452 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 654.

1453 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 636: “Definition 3 (Symbolic Semantics) Given a language with the syntax $\langle T, \Sigma_T \rangle$, a thereon defined syntactic part-whole relation Ξ_T and a meaning function $\mu: T \rightarrow M$, then its semantics $\langle M, \Sigma_M \rangle$ is symbolic if and only if there is a part-whole relation Ξ_M defined on M such that for all terms $s, t \in T$ the following holds:

$s \Xi_T t \rightarrow \mu(s) \Xi_M \mu(t)$.” (148)

1454 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.

1455 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.

1456 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.06.

1457 Unter Bezugnahme auf J. FODOR: A Theory of Content and other Essays. MIT Press. Cambridge / MA. 1990. PP. 51-87, v.a. PP. 56, 82 besteht dabei nach M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univer-

den externen Gehalten, die identisch sind i.S. eines sog. „Isomorphismus“ (engl. „isomorphism“)¹⁴⁵⁸ mit den Standard-modelltheoretischen Denotationen dieser Sprache, m.a.W., jede Denotation eines Ausdrucks in der Sprache besitzt einen möglichen entsprechenden neuronalen Zustand, der mit der Denotation kovariiert, sodaß man von einer sog. „emulativen Semantik“ (engl. „emulative semantics“)¹⁴⁵⁹ sprechen kann.¹⁴⁶⁰

5.3.01.31 Die Architektur eines Oszillatorischen Netzwerkes, die bereits kurz beschrieben worden war¹⁴⁶¹, als einem sog. „rekurrenten neuronalen Netzwerk“¹⁴⁶², ist nun derart weiterentwickelt worden, daß sie als ein plausibles Modell des Informationsprozesses im visuellen Cortex betrachtet werden kann¹⁴⁶³: Die Dynamik eines einzelnen Oszillators als einer elementaren

sity Press. Oxford. 2012. PP. 637-38 die Relation zwischen einer internen mentalen Repäsentation und ihrem Gehalt in Form einer kausal-informationellen Kovariation.

1458 S. hierzu z.B. M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 274-76.

Zum Begriff des sog. „Isomorphismus“ (engl. „isomorphism“) i.S. einer bijektiven linearen Abbildung in der Mathematik s. z.B. U. STORCH / H. WIEBE: Lehrbuch der Mathematik. Für Mathematiker, Informatiker und Physiker. Band II: Lineare Algebra. BI Wissenschaftsverlag. Mannheim u.a. 1990. S. 63, 73, 146 – S. BOSCH: Algebra. 6. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006. S. 13-14 – H.-J. KOWALSKY / G.O. MICHLER: Lineare Algebra. 10. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin u.a. 1995. S. 54-55 – M.P.H. WOLFF / P. HAUCK / W. KÜCHLIN: Mathematik für Informatik und Bioinformatik. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. S. 92-93 – B. PAREIGIS: Lineare Algebra für Informatiker. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. S. 98.

1459 S. Fn. 1458.

1460 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. PP. 636-38, v.a. P. 638: “We will demonstrate that the neural structure provides a compositional semantics of the language. Compositionality of meaning will hence be achieved. It will become obvious that this semantics is non-symbolic in the sense defined above. The principle of semantic constituency is negated. We will also show that the elements of the neural structure are internal representations that reliably co-vary with external contents. These external contents are identical with the standard model-theoretical denotations for the language. The covariation with content is achieved. It will finally become clear that the covariation is one-to-one such that the neural structure can be regarded as isomorphic to the external denotational structure. These results justify us to call the neural structure an emulative semantics. This is to say that each denotation of an expression in our language has a potential counterpart neural state that co-varies with the denotation.”

Zu einem Gegenbeispiel aus der Standard-modelltheoretischen Semantik für eine kompositionale, aber nicht-symbolische Semantik s. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 637.

1461 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.

1462 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1463 S. hierzu einleitend z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 288-90 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012.

Funktionseinheit, dessen exzitatorisches und inhibitorisches technisches Neuron jeweils die durchschnittliche Aktivität eines Clusters von etwa 80-200 biologischen kortikalen Neuronen repräsentiert, kann nun im sog. "Mean-Field Model"¹⁴⁶⁴ anhand der folgenden Differentialgleichungen beschrieben werden:

"(...) the dynamics of each oscillator can be described by two variables x and y (...) according to the following differential equations:

$$\frac{dx}{dt} = -\tau_x x - g_y(y) + L_0^{xx} g_x(x) + I_x + N_x \quad (149)$$

$$\frac{dy}{dt} = -\tau_y y + g_x(x) - I_y + N_y. \quad (150)$$

Here, τ_ξ ($\xi \in \{x, y\}$) are constants that can be chosen to match refractory times of biological cells. The g_ξ are transfer functions that tell how much of the activity of a neuron is transferred to other neurons. The constant L_0^{xx} describes self-excitation of the excitatory cell population. I_ξ are static external inputs and N_ξ variable white noise, which models fluctuation within the cell populations."¹⁴⁶⁵

PP. 642-44 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 208-11 – A. MAYE / M. WERNING: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. PP. 942-43.

S. hierzu eingehend z.B. A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 316-19 – A. MAYE: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002.

1464 S. z.B. A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 316-18. Im sog. „phasengekoppelten Oszillatormodell“ (engl. "Model with Phase-Coupled Oscillators") ist nach A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 318-19 dagegen der Zustand eines Oszillators anhand der Phase $\phi(t)$ und der Amplitude $a(t)$ gegeben, sodaß dessen Dynamik anhand der folgenden Differentialgleichungen beschrieben wird:

"(...) the dynamics of an oscillator is given by:

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sum_j s_{ij} a_j \sin(\phi_i - \phi_j) + \eta_i \quad (151)$$

$$\dot{a}_i = -a_i + h_i. \quad (152)$$

Weights s_{ij} comprise couplings within a feature module as well as between feature modules. Synchronizing connections have $s_{ij} > 0$, whereas desynchronizing connections are given by $s_{ij} < 0$. The same connection scheme as for the mean-field model is applied. Again, η is a noise term and h_i describes external input from the feature detectors."

1465 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 289.

S. auch A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. P. 317 – A. MAYE: Correlated Neuronal Activity Can Represent Multiple Binding Solutions. Neurocomputing.

Ein (Eigenschafts-)Modul (engl. "feature modul"), das eine Merkmalsdimension, z.B. eine bestimmte Farbe oder Orientierung, repräsentiert, besteht dabei aus einer dreidimensionalen topologischen (Gitter-)Struktur von Oszillatoren, wobei eine (Modul-)Schicht, aufgebaut i.S. einer zweidimensionalen retinotopen Struktur, jeweils eine Eigenschaft, z.B. 'rot' oder 'horizontal', kodiert, sodaß jeder Oszillator, zum einen, charakterisiert ist anhand seiner Position im rezeptiven Feld, dessen x,y-Koordinaten gegeben sind bezogen auf die zweidimensionale (Schicht-)Ebene, und, zum anderen, anhand seiner Merkmalsselektivität, abhängig von der z-Koordinate, die die jeweilige Schicht bzw. Eigenschaft bestimmt. Die Implementation der sog. „Gestaltprinzipien“¹⁴⁶⁶ erfolgt demnach derart, daß diejenigen Oszillatoren, die selektiv sind für Stimuluselemente mit ähnlichen Eigenschaften, dazu tendieren, sofern sie simultan stimuliert werden, synchrone Oszillationen auszubilden, weshalb man diese Oszillationen als *ein* Objektkonzept betrachten kann.

5.3.01.32 Die Dynamik eines Oszillatorischen Netzwerks kann man nun mit M. WERNING¹⁴⁶⁷ im Rahmen einer sog. „HILBERT-Raum Analyse“¹⁴⁶⁸ anhand der Oszillationen bzw. der Oszillationsfunktionen der Oszillatoren und dem Grad ihrer synchronen Aktivität beschreiben, wobei Oszillationsfunktionen als Vektoren im HILBERT-Raum betrachtet werden und dabei der HILBERT-Raum $L_2(\Omega)$ der i.S.d. sog. „LEBESGUE-Integrals“¹⁴⁶⁹ quadratisch-integrierbaren Funktionen zugrundegelegt wird:

“The oscillation spreading through the network can be characterized mathematically: An oscillation function, or more generally the activity function $x(t)$ of an oscillator is the activity of its excitatory neuron as a function of time during a time window $[-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}]$. Mathematically speaking, activity

Vol. 52-54. 2003. PP. 73-77, v.a. PP. 74-75.

1466 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.4.

1467 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 291 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 644-45 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 212-13.

1468 Einführend zum mathematischen Konzept der sog. „Hilberträume“ in der Funktionalanalysis s. z.B. D. WERNER: Funktionalanalysis. 5. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2005. S. 197-250 – J. HEINE: Topologie und Funktionalanalysis. Oldenbourg. München, Wien. 2009. S. 246-68 – H. FISCHER / H. KAUL: Mathematik für Physiker 2: Gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen, mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. 3. Aufl. Teubner. Wiesbaden. 2008. S. 221-41 – A. WACHTER / H. HOEBER: Repetitorium Theoretische Physik. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998. S. 241-57.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. I. PRIGOGINE / I. STENGERS: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993. S. 181-88.

1469 Einführend zum mathematischen Konzept des sog. „Lebesgue-Integrals“ s. z.B. H. FISCHER / H. KAUL: Mathematik für Physiker 2: Gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen, mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. 3. Aufl. Teubner. Wiesbaden. 2008. S. 205-208.

functions are vectors in the Hilbert space $L_2[-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}]$ of in the intervall $[-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}]$ square-integrable functions. This space has the inner product

$$\langle x(t)|x'(t) \rangle = \int_{-T/2}^{+T/2} x(t)x'(t)dt. \quad (153)$$

The degree of synchrony between two oscillations lies between -1 and +1 and is defined as their normalized inner product

$$\Delta(x, x') = \frac{\langle x|x' \rangle}{\sqrt{\langle x|x \rangle \langle x'|x' \rangle}}. \quad (154)$$

The degree of synchrony, so defined, corresponds to the cosine of the angle between the Hilbert vectors x and x' . The most important cases are:

$\Delta(x, x') = 1 \leftrightarrow x$ and x' are parallel (totally synchronous),

$\Delta(x, x') = 0 \leftrightarrow x$ and x' are orthogonal (totally uncorrelated),

$\Delta(x, x') = -1 \leftrightarrow x$ and x' are anti-parallel (totally anti-synchronous).¹⁴⁷⁰

5.3.01.33 Die Dynamik eines komplexen Systems wird nun im Rahmen der sog. „Synergetik“ (engl. „Synergetics”)¹⁴⁷¹ nach H. HAKEN bestimmt anhand einiger weniger dominierenden Zustände, der sog. „Eigenmoden“ (engl. „eigenmodes”)¹⁴⁷², geordnet anhand ihrer sog. „Eigenwerte“ λ (engl. „eigenvalue”), sodaß ein bestimmter Netzwerkzustand betrachtet werden kann anhand der Superposition des betreffenden Eigenvektors \mathbf{v}^i , der die exzitatorischen Aktivitäten all der entsprechenden Oszillatoren als Komponenten enthält, gewichtet mit der betreffenden charakteristischen Funktion $c_i(t)$ (engl. „characteristic function”).¹⁴⁷³ Die sog. „Eigenmoden-Ana-

1470 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 291.

1471 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

1472 Zum Begriff der sog. „(Eigen-)Mode(-analyse)“ s. z.B. H. HAKEN: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990. S. 12-16, 212 – H. HAKEN: Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. 2nd Ed. Springer. Berlin, Heidelberg u.a. 2000. PP. 45-49.

S. auch A. MAYE / A.K. ENGEL: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 626-31.

Siehe hierzu im einzelnen auch die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

1473 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 291-94 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 644-45 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation.

lyse“ (engl. “eigenmode analysis”)⁵³ trennt dabei die räumliche von der zeitlichen Variation in der (Gesamt-)Netzwerkdynamik, gegeben als ein kartesischer Vektor $\mathbf{x}(t)$ ¹⁴⁷⁴, bestehend aus all den Oszillationsfunktionen der aktiven Oszillatoren: Während die Eigenvektoren über die Zeit konstant sind, aber verantwortlich sind für das sich verändernde Verhalten der räumlich verteilten Oszillatoren des Netzwerks, sind die charakteristischen Funktionen dieselben für alle Oszillatoren, jedoch verantwortlich für die zeitliche Dynamik des Netzwerks als Ganzem¹⁴⁷⁵:

“The vector $\mathbf{x}(t)$ comprises the activities of the excitatory neurons of all k oscillators of the network after a transient phase and is determined by a solution of the system of differential equations¹⁴⁷⁶ (...).

For each eigenmode, the eigenvalue λ and its corresponding eigenvector \mathbf{v} are solutions of the eigen-equation for the auto-co-variance matrix $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{k \times k}$:

$$\mathbf{C}\mathbf{v} = \mathbf{C}\lambda, \quad (155)$$

where the components C_{ij} of \mathbf{C} are determined by the network dynamics $\mathbf{x}(t)$ as:

$$C_{ij} = \langle x_i | x_j \rangle. \quad (156)$$

(...) To assess the temporal evolution of the eigenmodes, the notion of a characteristic function $c_i(t)$ is introduced. The network state at any instant can be considered as a superposition of the eigenvectors \mathbf{v}^i weighted by the corresponding characteristic functions $c_i(t)$ (...):

$$\mathbf{x}(t) = \sum_i c_i(t) \mathbf{v}^i. \quad \text{''}^{53} \quad (157)$$

5.3.01.34 Die Dynamik eines Oszillatorischen Netzwerks kann man schließ-

Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 213-14 – A. MAYE / M. WERNING: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. PP. 943-46.

S. hierzu eingehend z.B. A. MAYE / M. WERNING: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. No. 2. 2007. PP. 319-20.

1474 S. z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 293.

1475 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 293.

Ein großer Vorteil der Eigenmoden-Analyse besteht ferner darin, daß eine Objektrepräsentation nicht mehr länger mit dem konkreten oszillatorischen Verhalten von Neuronen identifiziert wird, sondern mit dem der Eigenmoden-relativen charakteristischen Funktionen.

S. hierzu M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 646.

1476 S. Formel.149 und Formel.150.

lich mit M. WERNING¹⁴⁷⁷ einer semantischen Interpretation unterwerfen, da es „eine Struktur von internen Repräsentationen realisiert, die anhand einer monadischen Prädikatsprache erster Ordnung mit Identität $PL^=$ ausgedrückt werden kann“¹⁴⁷⁸. Die HILBERT-Raum Analyse erlaubt es nun Oszillationsfunktionen, da sie mit individuellen Objekten kovariieren, individuellen Termen einer Prädikatsprache $PL^=$ zuzuweisen, sodaß ein Satz der Prädikatsprache, z.B. $a = b$, einen repräsentationalen Zustand des Systems ausdrückt, z.B. die Identität von zwei Objekten, anhand zweier Individuenkonstanten a, b , entsprechend dem Grad, inwieweit zwei Oszillationsfunktionen $\alpha(a)$ und $\alpha(b)$ des Systems synchron sind:

“Because of Hyp. 5¹⁴⁷⁹ we are allowed to regard oscillation functions as internal representations of individual objects. They may thus be assigned some of the individual terms of the language $PL^=$. Let

$$Ind = \{a_1, \dots, a_m, z_1, \dots, z_n\} \quad (158)$$

be the set of individual terms of $PL^=$, then the partial function

$$\alpha : Ind \rightarrow L_2\left[-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}\right] \quad (159)$$

be a constant individual assignment of the language. By convention, I will assume for the domain of α , unless indicated otherwise, that

$$\text{dom}(\alpha) = \{a_1, \dots, a_m\} \quad (160)$$

so that the a_1, \dots, a_m are individual constants and the z_1, \dots, z_n are individual variables.

(...)

In case of identity sentences, for every eigenmode i and any individual

1477 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 294-95 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 645 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 214-15 – A. MAYE / M. WERNING: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. P. 946.

1478 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 294: “Oscillatory networks (...) realize a structure of internal representations expressible by a monadic first order predicate language with identity $PL^=$.”

1479 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 287: “Hypothesis 4 (Feature maps). *There are many cortical areas that function as topologically structured feature maps. They comprise clusters of neurons whose function it is to show activity only when an object in their receptive field instantiates a certain property of the respective feature dimension.*”

constants a, b , we have:

$$d(a=b, i) = \Delta(\alpha(a), \alpha(b)). \quad {}^{1480} \quad (161)$$

Um nun zu bestimmen bis zu welchem Grad eine bestimmte Oszillationsfunktion $\alpha(a)$, die einer Individuenkonstante a zugeordnet ist, einer Eigenschaftsschicht angehört, die einem Prädikat F zugeordnet ist, m.a.W., in der sog. „neuronalen Extension“ (engl. “neuronal extension”) eines Prädikates F ist, hat man zu berechnen, inwieweit sie maximal synchron ist mit einer der vorhandenen Oszillationsfunktionen in der betreffenden Eigenschaftsschicht, m.a.W. in der betreffenden neuronalen Extension.¹⁴⁸¹

Ein (monadisches) Prädikat F bezeichnet dabei eine Eigenschaft, die anhand eines neuronalen Eigenschafts-Clusters repräsentiert wird im Sinne der Diagonalmatrix $\beta(F)$ der betreffenden Eigenschaftsschicht, z.B. der Rot-Schicht im Rahmen des Farben-Moduls des Netzwerks, die sozusagen somit die sog. „neuronale Intension“ eines Prädikates darstellt¹⁴⁸²:

“Following Hyp. 4¹⁴⁸³, clusters of feature selective neurons function as representations of properties. They can be expressed by monadic predicates. I will assume that our language $PL^=$ has a set of monadic predicates

$$Pred = \{F_1, \dots, F_p\} \quad (162)$$

such that each predicate denotes a property represented by some feature cluster. To every predicate $F \in Pred$ I now assign a diagonal matrix $\beta(F) \in \{0, 1\}^{k \times k}$ that, by multiplication with any eigenmode vector \mathbf{v}^i , renders the sub-vector of those components that belong to the feature cluster expressed by F :

$$\beta : Pred \rightarrow \{0, 1\}^{k \times k}. \quad (163)$$

(...)

1480 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 294-95.

1481 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 296-97 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 646 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 215-16 – A. MAYE / M. WERNING: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. P. 947.

1482 S. Fn. 1481.

1483 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 288: “Hypothesis 5 (Synchrony). *Neurons of different feature clusters have the function to show synchronous activation only if the properties indicated by each feature cluster are instantiated by the same object in their receptive field.*”

Since $\beta(F)$ is a hardware feature of the network and does neither vary from stimulus to stimulus, nor from eigenmode to eigenmode (and is, modeltheoretically speaking, hence constant in all models), it is sensible to call it the *neuronal intension* of F .

The neuronal intension of a predicate, for every eigenmode, determines what I call its neuronal extension, i.e., the set of those oscillations that the neurons on the feature layer contribute to the activity the eigenmode adds to the overall networks dynamics. Unlike the neuronal intension, the neuronal extension varies from stimulus to stimulus and from eigenmode to eigenmode (just as extensions vary from possible world to possible world). Hence, for every predicate F its *neuronal extension* in the eigenmode i comes to:

$$\{f_j \mid \mathbf{f} = c_i(t) \beta(F) \mathbf{v}^i\}. \quad (164)$$

Here, the f_j are the components of the vector \mathbf{f} .

(...)

To determine to which degree an oscillation function assigned to an individual constant a is in the neuronal extension of a predicate F , we have to compute how synchronous it maximally is with one of the oscillation functions in the neuronal extension. We are, in other words, justified to evaluate the degree to which a predicative sentence Fa expresses a representational state of our system, with respect to the eigenmode i , in the following way:

$$d(Fa, i) = \max \{ \Delta(\alpha(a), f_j) \mid \mathbf{f} = c_i(t) \beta(F) \mathbf{v}^i \}. \quad {}^{1484} \quad (165)$$

Es wird nun abschließend eine explizite formale Beschreibung der neuronalen Semantik eines Oszillatorischen Netzwerks vorgenommen, einschließlich einer semantischen Bewertung der wahrheitsfunktionalen Junktoren und der prädikatenlogischen Quantoren, bezogen also auf eine einstellige Prädikatensprache erster Ordnung (PL^-) mit Identität, Prädikation, Konjunktion, Disjunktion, Implikation, Negation, Existenz- und Universalquantor. Da hierfür eine infinite, mehrwertige Semantik im Rahmen der sog. "fuzzy logic"¹⁴⁸⁵ benötigt wird, wird nach M. WERNING¹⁴⁸⁶ hierfür das

1484 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 296-97.

1485 S. hierzu einführend S. GOTTWALD: A Treatise on Many-Valued Logics. Research Studies Press. Baldock. 2001. PP. 423-70, 471-91.

S. hierzu auch Kap. 4.4.02.4, Fn. 1027.

1486 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 297-98, 300-304 – M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 649-51 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representa-

sog. „Min-Max-System“¹⁴⁸⁷ des Logikers Kurt GÖDEL herangezogen¹⁴⁸⁸:

“Besides the individual terms of Ind and the monadic predicates of $Pred$, the alphabet of $PL^=$ contains the logical constants $\wedge, \vee, \rightarrow, \neg, \exists, \forall$ and the binary predicate $=$. Provided we have the constant individual and predicate assignments α and β of (15)¹⁴⁸⁹ and (19)⁶⁴, the union

$$\gamma = \alpha \cup \beta \quad (166)$$

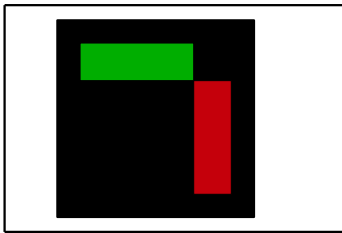
is a comprehensive constant assignment of $PL^=$. The individual terms in the domain of α are individual constants, those not in the domain of α are individual variables. The syntactic operations of the language $PL^=$ and the

tion. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 218-20.

1487 Zum GÖDELSchen Min-Max-System G_{∞} s. K. GÖDEL: Zum intuitionistischen Aussagenkalkül. Anzeiger Akademie der Wissenschaften Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Bd. 69. S. 65-66.

S. hierzu einführend z.B. S. GOTTWALD: A Treatise on Many-Valued Logics. Research Studies Press. Baldock. 2001. PP. 267-89, v.a. P. 272.

1488 Es wird ein Beispiel angegeben, indem dem Oszillatorischen Netzwerk ein roter vertikaler und ein grüner horizontaler Balken als Stimulus präsentiert werden (s. Graphik.46).



Graphik.46: Schematische Darstellung des Stimulus, bestehend aus einem roten vertikalen und einem grünen horizontalen Balken (angelehnt an M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 292).

S. hierzu z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 297-98: “(...) the system that fits my purpose best is Gödel’s (...) min-max-logics.

Here the conjunction is evaluated by the minimum of the values of the conjuncts (...). Let ϕ, ψ be sentences of $PL^=$, then, for any eigenmode i , we have:

$$d(\phi \wedge \psi, i) = \min\{d(\phi, i), d(\psi, i)\}. \quad (167)$$

The evaluations (...) allow us to regard the first eigenmode of the network dynamics, which results from stimulation with one red vertical object and one green horizontal object (...), as a representation expressed by the sentence

This is a red vertical object and that is a green horizontal object.

We only have to assign the individual terms *this* (= a) and *that* (= b) to the oscillatory functions $-c_1(t)$ and $+c_1(t)$, respectively, and the predicates *red* (= R), *green* (= G), *vertical* (= V) and *horizontal* (= H) to the redness, greenness, verticality and horizontality layers as their neuronal intentions. Simple computation then reveals:

$$d(Ra \wedge Va \wedge Gb \wedge Hb \wedge \neg a = b, 1) = 1." \quad (168)$$

1489 Die Nummern der Formeln ist der Zählung in diesem Kapitel angepaßt worden.

set SF of sentential formulae as their recursive closure can be defined as follows, for arbitrary $a, b, z \in Ind, F \in Pred$, and $\phi, \psi \in SF$:

$$(\dots) \sigma_{pred}:(a, F) \mapsto Fa; (\dots) \sigma_{\wedge}:(\phi, \psi) \mapsto \phi \wedge \psi; (\dots).^{1490} \quad (169)$$

The set of terms of $PL^=$ is the union of the sets of individual terms, predicates and sentential formulae of the language. A sentential formula in SF is called a *sentence* with respect to some constant assignment γ if and only if, under assignment γ , all and only individual terms bound by a quantifier are variables. Any term of $PL^=$ is called γ -*grammatical* if and only if, under assignment γ , it is a predicate, an individual constant, or a sentence. Taking the idea at face value that eigenmodes can be treated like possible worlds (or more neutrally speaking: like models), the relation ' i neutrally models ϕ to degree d by constant assignment γ ', in symbols

$$i \vDash_{\gamma}^d \phi, \quad (170)$$

for any sentence ϕ and any real number $d \in [-1, +1]$, is then recursively given as follows:

(...)

Predication: Given any individual constant $a \in Ind \cap \text{dom}(\gamma)$, and any predicate $F \in Pred$, then

$$i \vDash_{\gamma}^d \phi Fa \text{ iff } d = \max\{\Delta(\gamma(a), f_j) \mid \mathbf{f} = \gamma(F) \mathbf{v}^j c_i(t)\}. \quad (171)$$

Conjunction: Provided that ϕ, ψ are sentences, then

$$i \vDash_{\gamma}^d \phi \wedge \psi \text{ iff } d = \min\{d', d'' \mid i \vDash_{\gamma}^{d'} \phi \text{ and } i \vDash_{\gamma}^{d''} \psi\}. \quad (172)$$

(...).¹⁴⁹¹

5.3.01.35 Die (Neuro-)Emulative Semantik M. WERNING's hat nun verschiedene Anwendungen erfahren¹⁴⁹², z.B., indem sie von einer Ontologie von Gegenständen bzw. Objekten, lokalisiert in der ventralen visuellen Informationsverarbeitungsbahn, ausgeweitet wird zu einer Ontologie von Ereignissen, lokalisiert in der dorsalen visuellen Informationsverarbeitungsbahn¹⁴⁹³, oder, indem im Rahmen einer sog. „Theorie der (Neuro-)Frames“ (engl. “theory of neuro-frames”)¹⁴⁹⁴ aufgezeigt werden kann, auf welche Weise

1490 Es werden hier nur der Fall der Prädikation und der Konjunktion wiedergegeben.

1491 S. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 300-302.

1492 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 651.

1493 S. M. WERNING: Ventral vs. Dorsal Pathway: The Source of the Semantic Object/Event and the Syntactic Noun/Verb Distinction. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 26. 2003. PP. 299-300. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 3.40.

1494 S. M. WERNING: The “Complex first Paradox”: Why do Semantically thick Concepts so Early Lexicalize as Nouns? Interaction Studies. Vol. 9. 2008. PP. 67-83 in Verbindung mit W. PETERSEN / M.

ein neuronal realisiertes Substanz-Konzept als ein getyptes "Frame" in Form von synchronisierten neuronalen Clustern in attributive Subkonzepte analysiert werden kann, oder, indem mehrdeutige und auf einer (Sinnes-)Täuschung beruhende Repräsentationen thematisiert werden¹⁴⁹⁵, oder, wie bereits beschrieben¹⁴⁹⁶, indem die neuronale Repräsentation einer zweistelligen Relation miteinbezogen worden war.

5.3.01.36 Zusammenfassend kann man abschließend sagen¹⁴⁹⁷, daß das mathematisch-logische Modell der Oszillatorischen Netzwerke im allgemeinen und eng angelehnt an die empirischen Daten aus der Neurobiologie und Neurophysiologie beschreibt, wie – in der Zeit – anhand von neuronalen kortikalen Strukturelementen eine interne kompositionale Repräsentation erzeugt wird, bezogen auf einen bestimmten visuellen Wahrnehmungssachverhalt, sodaß die Bezugnahme eines sprachlichen Ausdrucks im Rahmen einer monadischen Prädikatsprache erster Ordnung mit Identität auf einen äußeren Sachverhalt in der Welt, gegeben anhand der Informationen im jeweiligen rezeptiven Feld, gewährleistet wird. Dies hat zur Konsequenz, daß dadurch beschrieben werden kann, wie einem bestimmten neuronalen temporalen (Synchronisations-)Prozeß ein Bedeutungsgehalt zugesprochen werden kann, der – im Rahmen eines (visuellen) Wahrnehmungsvorgangs – einem sprachlichen Ausdruck einen wahrgenommenen (Prädikations-)Sachverhalt zuordnet, was somit von M. WERNING als neuronale Extension (engl. "neuronal extension")¹⁴⁹⁸ bezeichnet wird. Dies impliziert damit eine isomorphe Transformation von diskreten Symbolstrukturen dieser Prädikatsprache erster Ordnung und ihren Denotationen in kontinuierliche Oszillation(-sfunktion)en der Neuronen des Oszillatorischen Netzwerks, da diese neuronalen Strukturelemente im Sinne eines Isomorphismus kovariieren¹⁴⁹⁹ mit den externen (Informations-)Gehalten des physikalischen perzeptiven sog. „Stimulus“ (engl. "stimulus"), die identisch sind mit der Standard-modelltheoretischen Struktur der Denotationen der Ausdrücke dieser (Prädikaten-)Sprache, sodaß ein Oszillatorisches Netzwerk mit seiner neuronalen (Oszillations(-funktions)- bzw. Eigen-

WERNING: Conceptual Fingerprints: Lexical Decomposition by Means of Frames – A Neuro-Cognitive Model. In: U. PRISS / S. POLOVINA / R. HILL (Eds.): *Conceptual Structures: Knowledge Architectures for Smart Applications*. Springer-Verl. Heidelberg. 2007. PP. 415-28 unter Hinweis auf L.W. BARSALOU: *Frames, Concepts, and Conceptual Fields*. In: A. LEHRER / E.F. KITTAY (Eds.): *Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Lexical and Semantic Organization*. Erlbaum. Hillsdale/NY. 1992. PP. 21-74 und Fr. PULVERMÜLLER: *Word's in the Brain's Language*. Behavioral and Brain Science. Vol. 22. 1999. PP. 253-70.

1495 S. M. WERNING / A. MAYE: *The Neural Basis of the Object Concept in Ambiguous and Illusory Perception*. In: R. SUN / N. MIYAKE (Eds.): *Proceedings of the Twenty-Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2006. PP. 876-81.

1496 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.2.

1497 S. z.B. M. WERNING: *Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics*. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 654.

1498 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.34.

1499 S. z.B. M. WERNING: *The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation*. Synthese. Vol. 146. 2005. P. 222. Fn. 1.

moden-)Struktur damit eine nicht-symbolische sog. „algebraische Emulation“ (engl. “algebraic emulation”)¹⁵⁰⁰ dessen erzeugt, was es im Rahmen seiner Perzeption, basierend auf dem Konzept des rezeptiven Feldes, repräsentiert.

Das (Simulations-)Modell repräsentiert demnach eine dynamische Momentaufnahme einer einzelnen visuellen Szene mit der Konstitution von mindestens zwei verschiedenen Objekten, z.B. einem vertikalen roten Balken und einem horizontalen grünen Balken (s. Graphik.46).¹⁵⁰¹

1500 Zum Begriff der sog. „Emulation“ (engl. “emulation”) s. das Zitat in Kap. 6.233 Fn. 23.

1501 S. z.B. M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 208-14.

5.3.02 SELF-ORGANIZING NEURONAL OSCILLATOR MODEL NACH P. KÖNIG UND Th.B. SCHILLEN

Ebenfalls die experimentelle Situation der temporalen Kodierung von Objekteigenschaften anhand der Synchronisation der oszillatorischen neuronalen Aktivität von kortikalen Assemblies in der Neurophysiologie simulierend¹⁵⁰², verwenden der Physiker und Neurophysiologe Peter KÖNIG¹⁵⁰³ und der Physiker und Psychiater Thomas B. SCHILLEN¹⁵⁰⁴, basierend auf dem sog. "WILSON-COWAN Network Oscillator Model"¹⁵⁰⁵, ein oszillatorisches Netzwerkmodell (engl. "oscillatory network model"), das sog. "Self-Organizing Neuronal Oscillator Model"¹⁵⁰⁶, bestehend aus einem einzelnen oder mehreren Eigenschaftsmodulen (engl. "feature modules") mit gekoppelten nichtlinearen Oszillatoren, zur Lösung des Bindungsproblems im Rahmen einer visuellen Szenenanalyse, dessen Systemdynamik anhand der folgenden Differentialgleichungen bestimmt wird¹⁵⁰⁷:

1502 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 3.3, 3.4.

1503 Zur Person Peter KÖNIG's siehe die Website www.cogsci.uniosnabrueck.de/NBP/peter-home.html.

1504 Zur Person Thomas B. SCHILLEN's siehe die Website http://www.klinikum-hanau.de/cms/kliniken_institute/klinik-fuer-psychiatrie-und-psychotherapie/klinikdetails/team/.

1505 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.30.

1506 Grundlegend s. z.B. Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Binding by Temporal Structure in Multiple Feature Domains of an Oscillatory Neuronal Network. *Biological Cybernetics*. Vol. 70. 1994. PP. 397-405 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Temporal Structure can Solve the Binding Problem for Multiple Feature Domains. In: Fr.H. EECKMAN / J.M. BOWER (Eds.): *Computation and Neural Systems*. Kluwer Academic Publishers. Boston, Dordrecht, London. 1993. PP. 503-507 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Temporal Coding by Coherent Oscillations as a Potential Solution to the Binding Problem: Neural Network Simulations. In: H.G. SCHUSTER (Ed.): *Nonlinear Dynamics and Neuronal Networks*. VCH Weinheim. New York, Basel, Cambridge. 1991. PP. 153-71 – P. KÖNIG / Th.B. SCHILLEN: Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. I. Synchronization. *Neural Computation*. Vol. 3. 1991. PP. 155-66 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. II. Desynchronization. *Neural Computation*. Vol. 3. 1991. PP. 167-77.

S. auch P. KÖNIG / B. JANOSCH / Th.B. SCHILLEN: Assembly Formation and Segregation by a Self-Organizing Neuronal Oscillator Model. In: Fr.H. EECKMAN / J.M. BOWER (Eds.): *Computation and Neural Systems*. Kluwer Academic Publishers. Boston, Dordrecht, London. 1993. PP. 509-13 – P. KÖNIG / Th.B. SCHILLEN: Segregation of Oscillatory Responses by Conflicting Stimuli – Desynchronizing Connections in Neural Oscillator Layers. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science Inc. Amsterdam u.a. 1990. PP. 117-20 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Coherency Detection and Response Segregation by Synchronizing and Desynchronizing Delay Connections in a Neuronal Oscillator Model. In: IEEE Neural Networks Council (Ed.): *International Joint Conference on Neural Networks*. Vol. II. San Diego/CA. 1990. PP. 387-95 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Coherency Detection by Coupled Oscillatory Responses – Synchronizing Connections in Neural Oscillator Layers. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science Inc. Amsterdam u.a. 1990. PP. 139-42.

1507 S. z.B. Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Binding by Temporal Structure in Multiple Feature Domains of an Oscillatory Neuronal Network. *Biological Cybernetics*. Vol. 70. 1994. P. 398 – Th.B. SCHILLEN / P. KÖNIG: Temporal Coding by Coherent Oscillations as a Potential Solution to the Binding Problem: Neural Network Simulations. In: H.G. SCHUSTER (Ed.): *Nonlinear Dynamics and Neuronal Networks*. VCH Weinheim. New York, Basel, Cambridge. 1991. PP. 154-55 – P. KÖNIG / Th.B. SCHILLEN: Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. I. Synchronization. *Neural*

$$\tau_0 \dot{x}_e(t) = -\alpha_e x_e(t) - w_{ie} F[x_i(t - \tau_{ie})] + i_e(t) + \eta_e(t) \quad (173)$$

$$\tau_0 \dot{x}_i(t) = -\alpha_i x_i(t) + w_{ei} F[x_e(t - \tau_{ei})] + \eta_i(t), \quad (174)$$

wobei α_e bzw. α_i eine Dämpfungskonstante ist, w_{ie} bzw. w_{ei} die Kopplungsstärke, τ die Verzögerungszeit (engl. "delay time"), $i_e(t)$ die externe Stimuluseingabe und F eine nichtlineare FERMI¹⁵⁰⁸-(Ausgabe-)Funktion mit einer Steigung (engl. "slope") σ und einem Schwellenwert (engl. "treshold") θ :

$$F[x(t)] = \frac{1}{e^{\sigma(\theta - x(t))} + 1}. \quad (175)$$

Die Architektur des Modells dient dabei als ein Vorläufermodell für die sog. „(Neuro-)Emulative Semantik“ (engl. "(neuro-)emulative semantics") M. WERNING's¹⁵⁰⁹, sodaß darauf nicht mehr näher eingegangen wird.¹⁵¹⁰

Computation. Vol. 3. 1991. P. 157.

1508 Diese (Verteilungs-)Funktion, benannt nach dem italienischen Physiker Enrico FERMI, stammt ursprünglich aus der Quantenstatistik.

S. hierzu z.B. U. SCHERZ: Quantenmechanik. Eine Einführung mit Anwendungen auf Atome, Moleküle und Festkörper. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1999. S. 545-46 – Cl. COHEN-TANNOUDJI / B. DIU / Fr. LALOË: Quantenmechanik. Band 2. 4. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 2010. S. 591.

1509 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.3.01.

1510 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.3.01.1, 5.3.01.31.

S. auch N. SALARI / A. MAYE: Brain Waves: How Synchronized Neuronal Oscillations Can Explain the Perception of Illusory Objects. VDM Verlag. Hamburg. 2008. PP. 20-21, 23.

5.4 SYSTEMATISCHE KLASSE DER SYNAPSEN-BASIERTEN ARCHITEKTURTYPEN

Die systematische Klasse der Synapsen-basierten Architekturtypen umfaßt diejenigen konnektionistischen Modelle (Kap. 5.4.01, 5.4.02), die unter der Klassifikation der sog. "Spiking Neural Networks (SNN)"¹⁵¹¹ bzw. "Spiking Neural Models"¹⁵¹² subsumiert werden können, d.h., die sich vor allem dadurch auszeichnen, daß der dynamische Zeitaspekt in der neuronalen Netzwerkmodellierung möglichst realistisch umgesetzt wird und damit der genaue Zeitpunkt des Auftretens eines Spikes¹⁵¹³ von Bedeutung ist, und daß man dabei Algorithmen verwendet, die einer sog. „synaptischen Modulation“ (engl. "synaptic modulation") in verschiedenen Zeitskalen unterliegen können, sodaß schnelle Verbindungsgewichtsveränderungen ermöglicht werden,¹⁵¹⁴ wodurch z.B. im Rahmen der temporalen Dynamik von stochastischen Synapsen damit einhergehende stabile Synchronisationsprozesse analysiert werden können.

1511 S. grundlegend z.B. W. MAASS: On the Computational Complexity of Networks of Spiking Neurons. In: G. TESAURO (Ed.): Eight Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). 28.11.-01.12. 1994, Denver/CO. Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 7. MIT Press. Cambridge/MA. 1995. PP. 183-90 – W. MAASS: Lower Bounds for the Computational Power of Networks of Spiking Neurons. Neural Computation. Vol. 8. 1996. PP. 1-40, v.a. PP. 2-4. S. eingehend z.B. W. MAASS: Computation with Spiking Neurons. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1080-83 – W. GERSTNER: Spiking Neurons. In: W. MAASS / Chr.M. BISHOP (Eds.): Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. (1999). 2001. PP. 3-54 – W. MAASS: Computation with Spiking Neurons. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP (Eds.): Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. (1999). 2001. PP. 55-85 – W. MAASS: Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. Neural Networks. Vol. 10. 1997. PP. 1659-71, v.a. P. 1662. S. einführend z.B. W. MAASS: Computing with Spikes. Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK. Vol. 8. 2002. PP. 32-36. Nach W. MAASS: Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. Neural Networks. Vol. 10. 1997. PP. 1659-71, v.a. P. 1659 stellen die sog. "Spiking Neural Networks (SNN)" die 3. Generation der neuronalen Netzwerkmodellierung dar, im Gegensatz zu den "McCulloch-Pitts neurons" (1. Generation) und den "feedforward and recurrent sigmoidal neural nets" (2. Generation).

1512 S. eingehend z.B. W. GERSTNER / W.M. KISTLER: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002.

1513 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.1.

1514 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.10.

5.4.01 STOCHASTIC SYNAPTIC MODEL (SSM) NACH W. MAASS und A.M. ZADOR

5.4.01.1 Indem nun die neuronale Informationsverarbeitung im Rahmen der sog. "spiking neural networks" als der dritten Generation der neuronalen Netzwerkmodellierung¹⁵¹⁵ um das Konzept einer nichtlinearen stochastischen (dynamischen) Synapse¹⁵¹⁶ erweitert worden ist, ist das sog. "Synaptic Stochastic Model (SSM)"¹⁵¹⁷ nach dem Mathematiker Wolfgang MAASS¹⁵¹⁸ und dem U.S.-amerikanischen Biologen Anthony M. ZADOR¹⁵¹⁹ entwickelt worden, wobei dabei die temporale Dynamik einer einzelnen stochastischen Synapse modelliert wird gemäß den folgenden Formeln¹⁵²⁰:

$$p_s(t_i) = 1 - e^{-C(t_i) \cdot V(t_i)} \quad (176)^{1521}$$

$$C(t) = C_0 + \sum_{t_i < t} c(t - t_i) \quad (177)^{1522}$$

1515 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.4.

1516 S. z.B. auch J.-Sh. LIAW / Th.W. BERGER: Dynamic Synapse: A New Concept of Neural Representation and Computation. Hippocampus. Vol. 6. 1996. PP. 591-600.

1517 Grundlegend s. z.B. W. MAASS / A.M. ZADOR: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. Neural Computation. Vol. 11. 1999. PP. 903-17 – W. MAASS / A.M. ZADOR: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. In: Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 10. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 194-200 – W. MAASS / A.M. ZADOR: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr.M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 321-36.

Einführend s. z.B. W. MAASS: Computation with Spiking Neurons. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1080-83.

1518 Zur Person Wolfgang MAASS' siehe die Website <http://www.igi.tugraz.at/maass/>.

1519 Zur Person Anthony M. ZADOR's siehe die Website <http://zadorlab.cshl.edu/>.

1520 S. z.B. W. MAASS / A.M. ZADOR: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. Neural Computation. Vol. 11. 1999. PP. 905-907 – W. MAASS / A.M. ZADOR: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. In: Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 10. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. P. 195 – W. MAASS / A.M. ZADOR: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 327-29.

1521 S. W. MAASS / A.M. ZADOR: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. P. 327: "The central equation in this model gives the probability $p_s(t_i)$ that the i^{th} spike in a presynaptic spike train $\underline{t} = (t_1, \dots, t_k)$ triggers the release of a vesicle at time t_i at synapse S ,

$$p_s(t_i) = 1 - e^{-C(t_i) \cdot V(t_i)}. \quad (178)$$

The release probability is assumed to be nonzero only for $t \in \underline{t}$, so that releases occur only when a spike invades the presynaptic terminal (i.e. the spontaneous release probability is assumed to be zero). The functions $C(t) \geq 0$ and $V(t) \geq 0$ describe, respectively, the states of facilitation and depletion at the synapse at time t ."

1522 S. W. MAASS / A.M. ZADOR: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. P. 327: "The dynamics of facilitation are given by

$$C(t) = C_0 + \sum_{t_i < t} c(t - t_i), \quad (179)$$

where C_0 is some parameter ≥ 0 that can for example be related to the resting concentration of calcium in the synapse. The exponential response function $c(s)$ models the response

$$V(t) = \max(0, V_0 - \sum_{t_i < t \text{ and } t_i \in S(t)} v(t-t_i)). \quad (180)^{1523}$$

5.4.01.2 Um die typische Komputationsweise i.S. einer "online computation" und eines "realtime computing" eines neurokognitiven Systems eines lebendigen biologischen Organismus angemessen zu modellieren, haben – im Gegensatz zu einer traditionellen sog. „TURING-Maschine“ (engl. "TURING-Machine (TM)") – Wolfgang MAASS, Thomas NATSCHLÄGER und Henry MARKRAM eine sog. "Liquid State Machine (LSM)"¹⁵²⁴ konstruiert (s. Graphik.47), die kontinuierliche Berechnungsprozesse in Realzeit ausführen kann¹⁵²⁵

$C(t)$ to a presynaptic spike that had reached the synapse at time $t-s$: $c(s) = \alpha \cdot e^{-s/\tau_c}$, where the positive parameters τ_c and α give the decay constant and magnitude, respectively, of the response. The function C models in an abstract way internal synaptic processes underlying presynaptic facilitation, such as the concentration of calcium in the presynaptic terminal. The particular exponential form used for $c(s)$ could arise for example if presynaptic calcium dynamics were governed by a simple first order process."

1523 S. W. MAASS / A.M. ZADOR: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 327-28: "The dynamics of depletion are given by

$$V(t) = \max(0, V_0 - \sum_{t_i < t \text{ and } t_i \in S(t)} v(t-t_i)), \quad (181)$$

for some parameter $V_0 > 0$. $V(t)$ depends on the subset of those $t_i \in t$ with $t_i < t$ on which vesicles were actually released by the synapse, i.e. $t_i \in S(t)$. The function $v(s)$ models the response of $V(t)$ to a preceding release of the same synapse at time $t-s \leq t$. Analogously as for $c(s)$ one may choose for $v(s)$ a function with exponential decay where $\tau_v > 0$ is the decay constant. The function V models in an abstract way internal synaptic processes that support presynaptic depression, such as depletion of the pool of readily releasable vesicles. In a more specific synapse model one could interpret V_0 as the maximal number of vesicles that can be stored in the readily releasable pool, and $V(t)$ as the expected number of vesicles in the readily releasable pool at time t .

In summary, the model of synaptic dynamics presented here is described by five parameters: C_0 , V_0 , τ_c , τ_v and α ."

1524 Grundlegend s. z.B. W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. PP. 2531-60, v.a. PP. 2534-36.

Eingehend s. z.B. W. MAASS: Liquid Computing. In: S.B. COOPER / B. LÖWE / A. SORBI (Eds.): Proceedings of the Conference CiE'07: Computability in Europe 2007, Siena, Italy. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2007. PP. 507-16, v.a. PP. 508-12.

1525 S. z.B. W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. P. 2534: "Like the Turing machine (...), the model of a liquid state machine (LSM) is based on a rigorous mathematical framework that guarantees, under idealized conditions, universal computational power. Turing machines, however, have universal computational power for off-line computation on (static) discrete inputs, while LSMs have in a very specific sense universal computational power for real-time computing with fading memory on analog functions in continuous time. The input function $u(\cdot)$ can be a continuous sequence of disturbances, and the target output can be some chosen function $y(\cdot)$ of time that provides a real-time analysis of this sequence. In order for a machine M to map input functions of time $u(\cdot)$ to output functions $y(\cdot)$ of time, we assume that it generates, at every time t , an internal 'liquid state' $x^M(t)$ which constitutes its current response to preceding perturbations, that is, to preceding inputs $u(s)$ for $s \leq t$ (...). In contrast to the finite state of a finite state machine (or finite automaton), this liquid

gemäß¹⁵²⁶

$$x^M(t) = (L^M u)(t), \quad (182)$$

wonach ein sog. „liquider (System-)Zustand“ (engl. “liquid state”) $x^M(t)$, der aus sämtlichen Informationen über den gegenwärtigen internen Zustand eines dynamischen Systems besteht, u.z. in Gestalt von analogen Werten, die sich über die Zeit kontinuierlich verändern können, sich aus der laufenden Ausgabe eines Operators oder zeitinvarianten sog. „liquiden Filters“ (engl. “liquid filter”) L^M ergibt, der eine Eingabefunktion $u(\cdot)$ auf die kontinuierliche Funktion $x^M(t)$ abbildet.

Danach wird der jeweils gegenwärtige liquide (System-)Zustand“ $x^M(t)$ – diesmal in einer aufgabenspezifischen Weise (engl. “task-specific manner”) anhand einer “memoryless¹⁵²⁷ readout map” f^M – zu jedem Zeitpunkt t in

state consists of analog values that may change continuously over time.”

S. z.B. W. MAASS: Liquid Computing. In: S.B. COOPER / B. LÖWE / A. SORBI (Eds.): Proceedings of the Conference CiE'07: Computability in Europe 2007, Siena, Italy. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2007. PP. 507-508: “The computation of a Turing machine always begins in a designated initial state q_0 , with the input x (...) written on some designated tape. The computation runs until a halt-state is entered (the inscription y of some designated tape segment is then interpreted as the result of the computation). This is a typical example for an *offline computation*, where the complete input x is available at the beginning of the computation, and no trace of this computation, or of its result y , is left when the same Turing machine subsequently carries out another computation for another input \tilde{x} (starting again in the state q_0). In contrast, the result of a typical computation in the neuronal system of a biological organism, say the decision about the location y on the ground where the left foot is going to be placed at the next step (...), depends on several pieces of information: (...) In general these diverse pieces of information arrive at different points in time, and the computation of y has started before the last one has come in. Furthermore, new information (...) arrives continuously, and it is left up to the computational system how much of it can be integrated into the computation of the position y of the next placement of the left foot (...). Once the computation of y is completed, the computation of the location y' where the right foot is subsequently placed is not a separate computation, that starts again in some neutral initial state q_0 . Rather, it is likely to build on pieces of inputs and results of subcomputations that had already been used for the preceding computation of y .

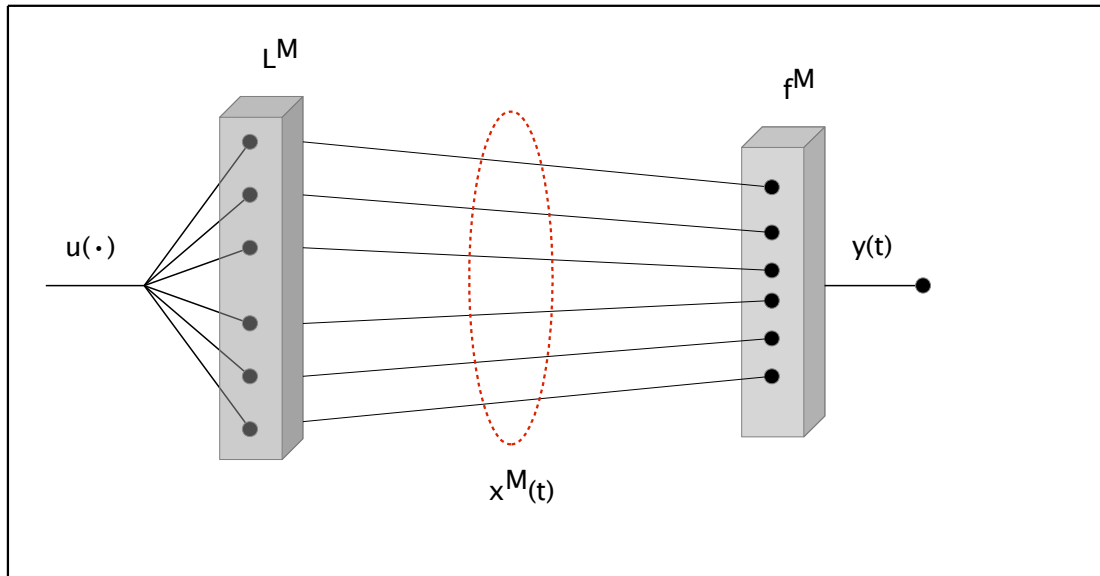
The previously sketched computational task is a typical example for an *online computation* (where input pieces arrive all the time, not in one batch). Furthermore it is an example for a real-time computation, where one has a strict deadline by which the computation of the output y has to be completed (...).”

1526 S. W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. PP. 2534-35.

1527 S. hierzu W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. P. 2536, Fn. 2: “The term *memoryless* refers to the fact that the readout map f^M is not required to retain any memory of previous states $x^M(s)$, $s < t$, of the liquid. However, in a biological context, the readout map will in general be subject to plasticity and may also contribute to the memory capability of the system. We do not explore this issue here because the differentiation into a memoryless readout map and a liquid that serves as a memory device is made for conceptual clarification and is not essential to the model.”

eine Ausgabe $y(t)$ transformiert gemäß¹⁵²⁸

$$y(t) = f^M(x^M(t)). \quad (183)$$



Graphik.47: Schematisches Diagramm der Architektur einer sog. "Liquid State Machine (LSM)": Eine Funktion $u(\cdot)$ wird in den sog. „liquiden Filter“ (engl. "liquid filter") L^M eingespeist, der zu jedem beliebigen Zeitpunkt t einen sog. „liquiden Zustand“ (engl. "liquid state") $x^M(t)$ erzeugt, der mittels einer "memoryless readout map" f^M , die für eine spezifische Aufgabe trainiert worden ist, zu jedem beliebigen Zeitpunkt t zu einer Ausgabe $y(t)$ transformiert wird (W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. P. 2535).

1528 S. W. MAASS / T. NATSCHLÄGER / H. MARKRAM: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. PP. 2535-36.

5.4.02 MODIFIED STOCHASTIC SYNAPTIC MODEL (MSSM) NACH K. EL-LAITHY UND M. BOGDAN

5.4.02.1 Im Rahmen der Untersuchung, ob und inwieweit das Konzept der temporalen Synchronizität anhand eines rekurrenten künstlichen neuronalen Netzwerks erzeugt werden kann, indem nichtlineare stochastische (dynamische) Synapsen verwendet werden, konstruieren die technischen (Neuro-)Informatiker Karim EL-LAITHY¹⁵²⁹ und Martin BOGDAN¹⁵³⁰ ein sog. "Modified Synaptic Stochastic Model (MSSM)"¹⁵³¹, u.z. eine modifizierte Version des sog. "Synaptic Stochastic Model (SSM)"¹⁵³² nach W. MAASS und A.M. ZADOR, bestehend aus zwei Netzwerkstrukturen von jeweils drei bzw. acht Neuronen¹⁵³³, wobei das Maximum der Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den gefilterten Signalen benutzt wird, um den Grad der Synchronizität anzuzeigen (s. Graphik.48).

Dabei wird das sog. "(Leaky-)Integrate-And-Fire ((L)IAF) Neuron Model"¹⁵³⁴,

1529 Zur Person Karim EL-LAITHY's siehe die Website <http://www.informatik.uni-leipzig.de/ti/lehrstuhl/mitarbeiter/wissenschaftlichemitarbeiter/ellaithy.html>.

1530 Zur Person Martin BOGDAN's siehe die Websites <http://www.informatik.uni-leipzig.de/ti/startseite.html> und <http://www.ti.uni-tuebingen.de/Leitung.20.0.html>.

1531 Grundlegend s. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag. Heidelberg. 2009. PP. 181-90, v.a. PP. 183-84.

Eingehend s. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation: An Approach Using Stochastic Synapses. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research. Vol. 1. 2011. PP. 17-25, v.a. PP. 17-25, v.a. PP. 19-20 – K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Predicting Spike-Timing of a Thalamic Neuron Using a Stochastic Synaptic Model. Proceedings of the European Symposium on Artificial Neural Networks. Computational Intelligence and Machine Learning. Bruges (Belgium), 28-30 April 2010. PP. 357-62, v.a. PP. 358-60 – K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: A Hypothetical Free Synaptic Energy Function and Related States of Synchrony. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21th International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 40-47, v.a. PP. 41-42.

1532 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.4.01.

1533 Die Annahmen in Bezug auf die neurobiologisch plausible Größe eines (künstlichen) neuronalen Netzwerks, bei der eine temporale Synchronizitätsaktivität der betreffenden Neuronen erwartet werden kann, schwankt zwischen zwei und etwa hundert Neuronen.

S. hierzu z.B. das sog. "small network argument" i.S. von M.H. HERZOG / M. ESFELD / W. GERSTNER: Consciousness & the Small Network Argument. Neural Networks. Vol. 20. 2007. PP. 1054-56.

S. auch W. SINGER / Ch.M. GRAY: Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis. Annual Review of Neuroscience. Vol. 18. 1995. PP. 555-86, v.a. P. 581.

1534 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag. Heidelberg. 2009. PP. 183, 184: "Each neuron is described by its voltage membrane potential V , that followed the following dynamics:

$$\tau_v \frac{dV}{dt} = -V + E_{psp}, \quad (184)$$

where τ_v is the membrane time constant, and E_{psp} is the total observed excitatory postsynaptic potential from all presynaptic terminals."

(...)

"(...) E_{psp} can be expressed as follows (...):

das die Dynamik des beobachtbaren exzitatorischen postsynaptischen Potentials E_{psp} beschreibt, anhand der Konzentration der Neurotransmittermoleküle C_{Nt} , mit dem sog. "Synaptic Stochastic Model (SSM)"¹⁵³⁵, das die Übertragungswahrscheinlichkeit eines ankommenden Aktionspotentials von einem präsynaptischen Neuron über eine Synapse zu einem postsynaptischen Neuron schätzt, geregelt durch zwei sich kompensierende Mechanismen der Erleichterung (engl. "facilitation") $C_c(t)$ ¹⁵³⁶ – anhand der Ca^{2+} -

$$\tau_{epsp} \frac{dE_{psp}}{dt} = -E_{psp} + C_{Nt}, \quad (185)$$

where τ_{epsp} is a decay time-constant. C_{Nt} is the concentration of the Nt in the synaptic cleft." Das sog. "(Leaky-)Integrate-And-Fire ((L)IAF) Neuron Model" stellt dabei eine der wichtigsten Klassen von mathematischen (Neuronen-)Modellen im Rahmen der sog. "Spiking Neural Networks (SNN)" dar.

S. hierzu z.B. E.R. KANDEL / J.H. SCHWARTZ / Th.M. JESSELL / St.A. SIEGELBAUM / A.J. HUDSPETH (Eds.): Principles of Neural Science. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2013. P. 1603.

S. auch H. HAKEN: Brain Dynamics. An Introduction to Models and Simulations. 2nd Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. (2002) 2008. PP. 141-43.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.4, Fn. 1515.

In späteren Publikationen, z.B. in K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: A Hebbian-Based Reinforcement Learning Framework for Spike-Timing-Dependent Synapses. In: K. DIAMANTARAS / WI. DUCH / L.S. ILIADIS (Eds.): Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'2010). Part II. Thessaloniki, Greece. September 15-18, 2010. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6353/2010. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010. PP. 160-69, v.a. P. 162 – K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: A Reinforcement Learning Framework for Spiking Networks with Dynamic Synapses. Journal of Computational Intelligence and Neuroscience. Vol. 2011. Doi: 10.1155/2011/869348. PP. 1-12, v.a. PP. 3-6, wird ferner auf das "MARKRAM-TSODYKS (synaptic) Model" zurückgegriffen.

S. hierzu H. MARKRAM / Y. WANG / M. TSODYKS: Differential Signaling via the Same Axon of Neocortical Pyramidal Neurons. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 95. 1998. PP. 5323-28.

1535 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag. Heidelberg. 2009. PP. 183-84: "The probability that the i^{th} spike in the spike train triggers the release of a vesicle at time t_i at a given synapse is given by:

$$P(t_i) = 1 - e^{-(C_c(t_i) \cdot C_v(t_i))}, \quad (186)$$

where $C_c(t_i)$ and $C_v(t_i)$ represent the facilitation and depression mechanisms respectively at t_i ."

S. Fn. 1532.

1536 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag. Heidelberg. 2009. PP. 183-84: " $C_c(t_i)$ and $C_v(t_i)$ are expressed mathematically as follows (...):

$$C_c(t) = C_{C_0} + \sum_{t_i} \alpha e^{-(t-t_i/\tau_{c_c})} \quad (187)$$

$$C_v(t) = \max(C_{V_0} - \sum_{t_i} e^{-(t-t_i/\tau_{v_c})}) \quad (188)$$

(...) τ_{c_c} and α represent the decay constant and the magnitude of the response respectively. C_{C_0} represents the initial concentration of Ca^{2+} in the pre-synaptic terminal. (...) $C_v(t)$ is the expected number of vesicles of neurotransmitter molecules (Nt) in the ready-for-release pool at

Konzentration – und der Unterdrückung (engl. “depression”) $C_v(t)$ ¹⁵³⁷ – anhand der Vesikel-Konzentration, zu einem sog. “Modified Synaptic Stochastic Model (MSSM)”¹⁵³⁸ vereinigt.

Es wird ferner eine HEBB-basierte Lernregel¹⁵³⁹ eingeführt, die zeigt, wie die Zeitparameter und Konstanten der elektrochemischen Mechanismen neu eingestellt werden können, basierend auf der Aktivität der prä- und postsynaptischen Neuronen. Zusätzlich zur Lernrate r wird ein sog. “feedback parameter” K als Modulator (engl. “modulator”)¹⁵⁴⁰ eingeführt, der den Fortschritt repräsentiert, inwieweit eine häufigere stabile Synchronizität zwischen den Ausgangssignalen der betreffenden Neuronen erzeugt wird, d.h. ein höherer Mittelwert R_m der maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten.

5.4.02.2 Basierend auf der sog. “Liquid State Machine (LSM)” nach W. MAASS, Th. NATSCHLÄGER und H. MARKRAM¹⁵⁴¹ verwenden K. EL-LAITHY und M. BOGDAN¹⁵⁴² – als eine Implementation einer LSM – ein rekurrentes künstliches Netzwerk in Form einer Kolumne, deren Aktivität von einer Anzahl von aufgabenspezifischen “side networks”, auch als sog. “readout map” bezeichnet¹⁵⁴³, ausgelesen und transformiert wird, die zwar ihre Eingaben aus demselben Gesamtverband an interner neuronaler Aktivität in Form von “spikes” erhalten, jedoch anhand einer verschiedenen Konfiguration von Neuronen der Kernmaschine (engl. “core machine”), d.h. durch einen (Unter-)Verband mit einer kollektiv-synchronen neuronalen Aktivität, der als ein

time t . C_{v_0} is the max. number of vesicles that can be stored in the pool. τ_{v_e} is the time constant for refilling the vesicles.”

1537 S. Fn. 1536.

1538 S. Fn. 1531.

1539 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag, Heidelberg, 2009. P. 186: “The update of the contribution values could be mathematically formed as follows: $m_{new} = (1 \pm r)m_{current}$, where r is the learning rate. (...)”

We introduce a feedback parameter, K , that represents the advance in the direction of getting both more and stable synchrony between the responses (i.e. a higher cross-correlation coefficient). Thus, it is the difference in the observed synchrony R_m from the current run and the previous one, mathematically expressed as follows:

$$K = R_{m_{current}} - R_{m_{previous}} \quad (189)$$

K is used as a modulator to the learning rate. Thus, the learning rule can be rewritten as follows:

$$m_{new} = (1 \pm r \cdot K)m_{current} \quad (190)$$

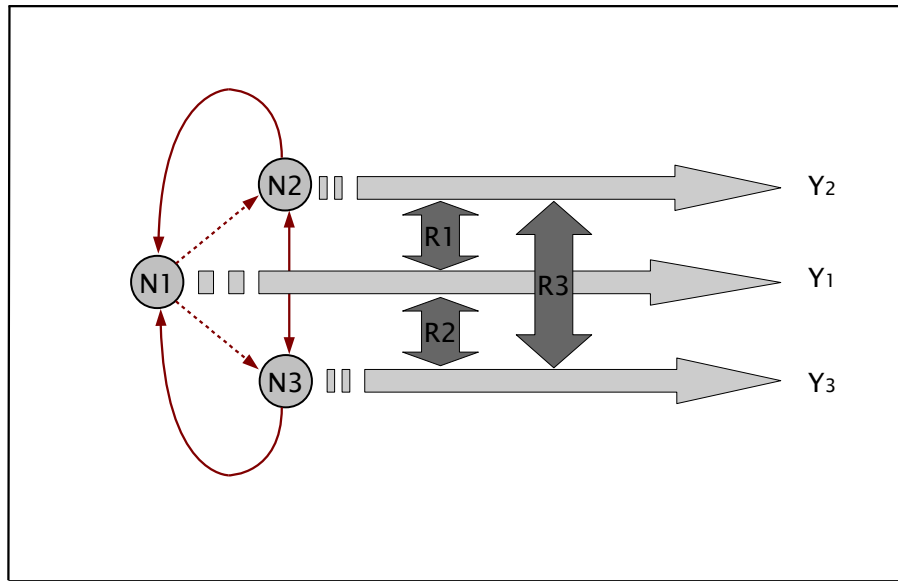
K can reverse the direction of the updating process of the parameters since it is a signed value, and can either accelerate or decelerate the learning process.”

1540 S. Fn. 1539.

1541 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.4.01.2.

1542 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: On the Capacity of Transient Internal States of Synchrony in Liquid State Machines. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2011. PP. 56-63.

1543 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.4.01.2.



Graphik.48: Schematisches Diagramm des sog. "Modified Synaptic Stochastic Model (MSSM)" mit einer Netzwerkstruktur bestehend aus drei Neuronen, wobei die gestrichelten Pfeile diejenigen Synapsen darstellen, die trainiert werden sollen, u.z. zwischen dem Neuron N_1 und den Neuronen N_2 und N_3 . Der Doppelpfeil stellt eine wechselseitige Verbindung zwischen den Neuronen N_2 und N_3 dar. Die horizontalen hellgrauen Doppelpfeile stehen für die Ausgangssignale Y_1 , Y_2 und Y_3 der jeweiligen Neuronen, und die vertikalen dunkelgrauen Doppelpfeile für die entsprechenden Kreuzkorrelationskoeffizienten R_1 , R_2 und R_3 (angelehnt an K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag, Heidelberg, 2009. P. 185).

Systemzustand definiert werden kann, sodaß eine Abbildung von einem finiten physikalischen Systemzustandsraum in einen infiniten informationellen Systemzustandsraum vorgenommen werden kann.¹⁵⁴⁴ Dabei erweist sich die synaptische Repräsentation des "Modified Synaptic Stochastic Model (MSSM)" effizienter, indem es (zumindest) zwei verschiedene transiente, stabile Systemzustände im Rahmen einer synchronen Aktivität zu erzeugen in der Lage ist, womit eine Grundbedingung eines neuronalen dynamischen Systems i.S. seines Vermögens eine Berechnung auszuführen (engl. "the capacity to compute") erfüllt wäre, die darin besteht, daß seine sensorischen Informationen über eine bestimmte Anzahl von verschiedenen Mengen an Synchronizitätszuständen repräsentiert werden können.¹⁵⁴⁵

1544 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: On the Capacity of Transient Internal States of Synchrony in Liquid State Machines. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21th International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2011. PP. 56-57.

1545 S. z.B. K. EL-LAITHY / M. BOGDAN: On the Capacity of Transient Internal States of Synchrony in Liquid State Machines. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21th International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag, Berlin u.a. 2011. PP. 57-58.

6. KONSEQUENZEN UND IMPLIKATIONEN DES SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS FÜR DIE (KOGNITIVE) (NEURO-)PHILOSOPHIE UND WISSENSCHAFTSTHEORIE

Im vorliegenden Kapitel werden im Folgenden die Konsequenzen und Implikationen der Analyse der kognitiven (Neuro-)Architekturen mit ihren integrativen (Synchronisations-)Mechanismen (Kap. 4.3, Kap. 4.4 und Kap. 5.1-5.4), deren empirisch-experimentellen Belegen aus den Kognitiven Neurowissenschaften (Kap. 3), und die damit zusammenhängende (Hypo-)These einer neuen integrativen Theorie der kognitiven (Neuro-)Philosophie und Wissenschaftstheorie vor dem Hintergrund eines Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus (Kap. 2.2, Kap. 4.1 und Kap. 4.2) auf der Basis eines (Generellen) Dynamischen System- und Selbstorganisations-Paradigmas (Kap. 1.2) angedacht und diskutiert. Zuerst wird dabei ein philosophiehistorischer Exkurs unternommen, um die (Weiter-)Entwicklung eines Gedankenganges aufzuzeigen, wie verschiedene Repräsentationsformate von Kognition und kognitiver Informationsverarbeitung entworfen worden sind, um deren (formale) Bedingungen immer exakter und präziser zu modellieren (Kap. 6.1). Danach wird, auf der Basis der dargestellten kognitiven (Neuro-)Architekturen mit ihren integrativen (Synchronisations-)Mechanismen, die (das) allgemeine vektorielle Form(-at) eines neurokognitiven (Repräsentations-)Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus informell anhand der sog. „Gebirgssee-“ und „Gebirgsbach“-Metapher skizziert (Kap. 6.2). Anschließend wird dann vor allem diskutiert, zum einen, ob und inwieweit diese verschiedenen kognitiven (Neuro-)Architekturen das Bindungsproblem in Bezug auf die Wahrnehmungskognition (“low-level cognition”) angemessen lösen können (Kap. 6.3), und, zum anderen, ob und inwieweit sie es in Bezug auf die Sprachkognition (“high-level cognition”) angemessen lösen können, insbesondere was die Kompositionalitäts- und Systematizitätsproblematik betrifft (Kap. 6.4). Abschließend wird noch kurz erörtert, inwieweit eine darauf aufbauende integrative Theorie der (Neuro-)Kognition im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus in den neueren (Forschungs-)Ansatz des Embodiment und der Embodied Cognition eingebettet werden könnte (Kap. 6.5).

6.1 PHILOSOPHIEHISTORISCHER EXKURS: (REPRÄSENTATIONS-)FORMATE DER KOGNITION

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden in groben Zügen die (philosophiehistorische) These zu skizzieren versucht, inwieweit die m.E. am besten zu bezeichnende, sog. „vektorielle Form“, als Basis eines (Generellen) Dynamischen System- und Selbstorganisations-Paradigmas und eines Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus, i.S. einer Weiterentwicklung und Ergänzung der jeweiligen Repräsentationsformate von Kognition bzw. von internen mentalen Repräsentationen zu betrachten sind, und von den (formalen) Bedingungen bzw. Voraussetzungen des menschlichen Denkens und seiner Theorie- und Modellkonstruktion seit G.W. LEIBNIZ (Kap. 6.11) über D. HUME (Kap. 6.12), I. KANT (Kap. 6.13) und den Protagonisten des sog. „Wiener Kreises“ (Kap. 6.14) bis zu den Konnektionisten in der Philosophie neueren Datums (Kap. 6.15).

6.11 KOMPUTATIONALE FORM DER KOGNITION IM RAHMEN DER MONADOLOGIE UND EINER MATHESIS UNIVERSALIS NACH G.W. LEIBNIZ

Von den siebziger Jahren des 17. Jhdts. bis zum beginnenden 18. Jhd. hat der Philosoph, Mathematiker und (Natur-)Wissenschaftler Gottfried Wilhelm LEIBNIZ¹⁵⁴⁶, einer der Hauptvertreter des neuzeitlichen Rationalismus, die Position entwickelt, daß das menschliche Denken und Wissen als ein Rechen- bzw. ein Berechnungsvorgang¹⁵⁴⁷ aufgefaßt und darauf zurückgeführt werden kann, womit er m.E. – nach heutiger Terminologie – der (menschlichen) Kognition eine sog. „komputationale Form“ zugewiesen hat¹⁵⁴⁸: Ausgehend von seiner sog. „Monadologie“ (franz.: „Éclaircissement sur les Monades“) mit ihrer sog. „Perzeptionentheorie“¹⁵⁴⁹, wonach – aus der Sicht der heutigen modernen Informatik¹⁵⁵⁰ – eine „Monade“¹⁵⁵¹ i.S. eines elementaren „natürlichen Automaten“¹⁵⁵², d.h. ein autonomes, komputationales und dynamisches

1546 Grundlegend s. G.W. LEIBNIZ: Sämtliche Schriften und Briefe. Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Akademie-Verlag. Berlin. (1663-1703) 1923-2012.

Eingehend s. z.B. G.W. LEIBNIZ (neu übers., eingeleitet u. erl. von H. GLOCKNER): *Monadologie*. (Originaltitel: *Principes de la Nature et de la Grâce fondés en Raison*). Philipp Reclam. Stuttgart. (1714) 1986.

Einführend s. z.B. N. RESCHER: *Leibniz: An Introduction to his Philosophy*. Basil Blackwell. Oxford 1979 – M.-Th. LISKE: *Gottfried Wilhelm Leibniz*. Beck. München 2000 – Kl. MAINZER: *G.W. Leibniz*. In: K. v. MEYENN: *Klassiker der Physik*. Bd. I. Beck. München. 1997. S. 212-28 – H. SCHOLZ: *Leibniz*. *Jahrbuch der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaft*. 1942. S. 205-49 (Wiederabgedruckt in: A. HEINEKAMP / Fr. SCHUPP (Hrsg.): *Leibniz' Logik und Metaphysik*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt 1988. S. 118-51) – Br.C. LOOK: *Gottfried Wilhelm Leibniz*. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (May 15, 2009 Edition).

Allgemein einführend s. z.B. J. HIRSCHBERGER: *Geschichte der Philosophie*. Band II: *Neuzeit und Gegenwart*. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 148-88.

1547 S. z.B. Kl. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. PP. 166-69 – Kl. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis. Paderborn. 2010. S. 18-24.

1548 Ebenfalls bereits in den fünfziger Jahren des 17. Jhdts. hatte der Mathematiker, Staatstheoretiker und Philosoph Thomas HOBBS vernünftiges Denken mit Rechnen gleichgesetzt.

S. z.B. Th. HOBBS (J.C.A. GASKIN (Ed.)): *Leviathan*. Oxford University Press. Oxford. (1651) 1998. Chap. 4., Chap. 5.

1549 S. G.W. LEIBNIZ (neu übers., eingeleitet u. erl. von H. GLOCKNER): *Monadologie*. Philipp Reclam. Stuttgart. (1714) 1986. § 14, 15. S. 15-16.

Einführend s. z.B. H. POSER: *Leibniz' Theorie der Perzeptionen heute*. In: E. BARKE / R. WERNSTEDT / H. BREGER (Hrsg.): *Leibniz neu denken*. Steiner. Stuttgart. 2009. S. 15-35, v.a. S. 15-17, 19-20, 33-35.

1550 S. z.B. Kl. MAINZER: *Leibniz und die moderne Informatik*. In: H. POSER (Hrsg.): *Akten des VII. Internationalen Leibniz-Kongresses: Nihil Sine Ratione – Mensch, Natur und Technik im Wirken von G.W. Leibniz*. Berlin, 10-14. September 2001. 2002. S. 765-71.

1551 S. G.W. LEIBNIZ (neu übers., eingeleitet u. erl. von H. GLOCKNER): *Monadologie*. Philipp Reclam. Stuttgart. (1714) 1986. §§ 1-13. S. 13-15.

Einführend s. z.B. N. RESCHER: *Leibniz: An Introduction to his Philosophy*. Basil Blackwell. Oxford 1979. PP. 68-75 – M.-Th. LISKE: *Gottfried Wilhelm Leibniz*. Beck. München 2000. S. 122-27 – Kl. MAINZER: *G.W. Leibniz*. In: K. v. MEYENN: *Klassiker der Physik*. Bd. I. Beck. München. 1997. S. 212-28.

1552 S. G.W. LEIBNIZ (neu übers., eingeleitet u. erl. von H. GLOCKNER): *Monadologie*. Philipp Reclam. Stuttgart. (1714) 1986. § 64. S. 28-29.

S. hierzu z.B. Kl. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis. Paderborn. 2010. S. 20.

(Sub-)System, mit einem mathematisch-logischen Computermodell identifiziert werden kann. Ein Prototyp eines solchen Automaten besteht nun in den von G.W. LEIBNIZ erfundenen Dezimal- und Dualrechenmaschinen, wodurch er, unter Einbeziehung des ebenfalls von ihm entwickelten Dualsystems, zu einem Wegbereiter der modernen Informatik mit ihren Computer(-simulations-)modellen wird.¹⁵⁵³ Diese dabei angewendete rein mechanische Technik in Form von komputationalen Operationen soll nun dazu dienen, im Rahmen seines Programms einer sog. „Mathesis Universalis“¹⁵⁵⁴ i.S. einer Universalwissenschaft sämtliche wissenschaftlichen Problemstellungen mit einem allgemeinen Rechenverfahren sicher und umfassend lösen zu können, indem eine universelle logische Symbolsprache i.S. eines Logikkalküls zu entwerfen ist, die dann – wie in der heutigen modernen Informatik – arithmetisch kodiert und maschinell weiterverarbeitet werden kann.¹⁵⁵⁵

1553 S. Kl. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis. Paderborn. 2010. S. 22-23 – Kl. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. PP. 167-68.

1554 S. einführend hierzu z.B. J. MITTELSTRASS / P. SCHROEDER-HEISTER: *Zeichen, Kalkül, Wahrscheinlichkeit. Elemente einer Mathesis universalis bei Leibniz*. In: H. STACHOWIAK (Hrsg.): *Pragmatik. Handbuch pragmatischen Denkens*. Bd. I. Pragmatisches Denken von den Ursprüngen bis zum 18. Jahrhundert. Meiner. Hamburg. 1986. S. 392-414 – J. MITTELSTRASS: *The Philosopher's Conception of Mathesis Universalis from Descartes to Leibniz*. *Annals of Science*. Vol. 36. 1979. PP. 593-619.

1555 S. Kl. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis. Paderborn. 2010. S. 23-24 – Kl. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994. PP. 168-69.
S. auch W. LENZEN: *Calculus universalis. Studien zur Logik von G. W. Leibniz*. Mentis. Paderborn 2004.

6.12 ASSOZIATIVE FORM DER KOGNITION IM RAHMEN DES EMPIRISCH-MECHANISCHEN PSYCHOLOGISMUS NACH D. HUME

Von den dreißiger bis zu den sechziger Jahren des 18. Jhdts hat der schottische Philosoph und Historiker David HUME¹⁵⁵⁶, einer der Hauptvertreter des englischen Empirismus, im Rahmen seines (mechanischen) Psychologismus dem (menschlichen) Denken eine sog. „assoziative Form“ zugeschrieben (sog. „empiristischer Assoziationismus“), wonach komplexe Vorstellungen (engl. „ideas“) durch Assoziation (engl. „association (of ideas)“)¹⁵⁵⁷, dem psychischen Grundgesetz schlechthin¹⁵⁵⁸, mit den dazugehörigen Assoziationsgesetzen (engl. „principles of association“)¹⁵⁵⁹ aus elementaren Ideen aufgebaut

-
- 1556 Grundlegend s. D. HUME (compiled and edited by M.C. ROOKS): *The Complete Works and Correspondence of David Hume*. IntelLex Corporation: Charlottesville. 1995.
Eingehend s. z.B. D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *An Enquiry Concerning Human Understanding*. In: *Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals*. 3rd Ed. Oxford University Press. Oxford. (1748, 1777) 1975 – D. HUME (ed. by T.L. BEAUCHAMP): *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Oxford University Press. Oxford. (1748) 1999 – D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. 2nd Ed. Clarendon Press. Oxford. (1749/50) 1978 – D. HUME (D.F. NORTON / M.J. NORTON (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. Oxford University Press. Oxford. (1749/50) (2000) 2009 – D. HUME (dt. Übers. von R. RICHTER): *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. (1748) 2007.
Einführend s. z.B. G. STREMMINGER: *David Hume. Sein Leben und sein Werk* 2. Aufl. Schöningh. Paderborn. 1994 – G. DELEUZE: *David Hume*. Campus. Frankfurt. 1997 – B. STROUD: *Hume*. Routledge & Kegan. London u.a. 1977 – J. KULENKAMPFF: *David Hume*. 2. Aufl. Beck. München 1989 – W.E. MORRIS: *David Hume*. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (December 22, 2007 Edition).
Allgemein einführend s. z.B. J. HIRSCHBERGER: *Geschichte der Philosophie*. Band II: *Neuzeit und Gegenwart*. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 223-45.
- 1557 S. D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *An Enquiry Concerning Human Understanding*. In: *Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals*. 3rd Ed. Oxford University Press. Oxford. (1748, 1777) 1975. Section III. PP. 23-24.
S. einführend z.B. J. HIRSCHBERGER: *Geschichte der Philosophie*. Band II: *Neuzeit und Gegenwart*. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 227-28.
S. auch H. PEUKERT: *Kindliche Kalkulationen. Eine Computersimulation über den Einfluss stochastischer Informationen auf die Wortsegmentierung beim Erstspracherwerb*. Dissertation. Universität Kassel. Fachbereich Sprach- und Literaturwissenschaft. Kassel University Press GmbH. Kassel. 2009. S. 33-34.
- 1558 Analog der Gravitationstheorie des englischen Physikers und Philosophen Sir Isaac NEWTON's. S. D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. 2nd Ed. Clarendon Press. Oxford. (1749/50) 1978. P. 23: "Among different languages, even where we cannot suspect the connexion or communication, it is found, that the words, expressive of ideas, the most compounded, do yet nearly correspond to each other: a certain proof that the simple ideas, comprehended in the compound ones, were bound together by some universal principle, which had an equal influence on all mankind."
S. auch J. HIRSCHBERGER: *Geschichte der Philosophie*. Band II: *Neuzeit und Gegenwart*. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 228.
- 1559 S. im einzelnen hierzu D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *An Enquiry Concerning Human Understanding*. In: *Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals*. 3rd Ed. Oxford University Press. Oxford. (1748, 1777) 1975. Section III. PP. 23-24 – D. HUME (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. 2nd Ed. Clarendon Press. Oxford. (1749/50) 1978. PP. 661-62 – D. HUME (D.F. NORTON / M.J. NORTON (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. Oxford University Press. Oxford. (1749/50) (2000) 2009. PP. 12-14, v.a. P.

werden, womit er eine der Grundideen des modernen (Neo-)Konnektionismus vorweggenommen hat¹⁵⁶⁰, u.z., daß (perzeptive) Bewußtseinsinhalte nach bestimmten grundlegenden assoziativen (Berechnungs-)Regeln im Rahmen eines kognitiven Mechanismus¹⁵⁶¹ verknüpft werden können.

12: "As all simple ideas may be separated by the imagination, and may be united again in what form it pleases, nothing wou'd be more unaccountable than the operations of that faculty, were it not guided by some universal principles, which render it, in some measure, uniform with itself in all times and places. Were ideas entirely loose and unconnected, chance alone wou'd join them; and 'tis impossible the same simple ideas shou'd fall regularly into complex ones (as they commonly do) without some bond of union among them, some associating quality, by which one idea naturally introduce another".

S. einführend z.B. H.W. NOONAN: Hume on Knowledge. Routledge. New York u.a. 1999. PP. 71-75 – J. HIRSCHBERGER: Geschichte der Philosophie. Band II: Neuzeit und Gegenwart. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 228.

S. auch Fn. 1558.

1560 S. ebenso z.B. D. RYDER / O.V. FAVOROV: The New Associationism: A Neural Explanation for the Predictive Power of Cerebral Cortex. Brain and Mind. Vol. 2. 2001. PP. 161-94, v.a. PP. 162-64 – P. GÄRDENFORS: Concept Learning: A Geometrical Model. Proceedings of the Aristotelian Society. Vol. 101. 2001. P. 167.

Kritisch dazu s. z.B. W.J.M. LEVELT: Die konnektionistische Mode. Sprache & Kognition. Vol. 10. 1991. S. 71.

1561 Vgl. z.B. D. GARRETT: Cognition and Commitment in Hume's Philosophy. Oxford University Press. New York, Oxford. 1997. PP. 169-71.

6.13 KATEGORIALE FORM DER KOGNITION IM SINNE DER TRANSZENDENTALPHILOSOPHIE NACH I. KANT

In den achtziger und neunziger Jahren des 18. Jhdts.¹⁵⁶² hat der Philosoph Immanuel KANT¹⁵⁶³, der Begründer des deutschen Idealismus, im Rahmen seiner – eine Synthese aus Rationalismus und Empirismus bildende – Transzendentalphilosophie, dem (menschlichen) Denk- und Erkenntnisvermögen eine sog. „kategoriale Form“ zu Grunde gelegt (sog. „kritischer Idealismus“), wonach neben den subjektiven apriorischen Anschauungsformen im Rahmen der sinnlichen Wahrnehmung (sog. „Transzendente Ästhetik“) noch subjektive apriorische Denkformen i.S. von konstitutiven Prinzipien des Verstandesvermögens hinzutreten (sog. „Transzendente Logik bzw. Transzendente Analytik“), und damit ein vollständiges (kognitives) System von zwölf sog. „Kategorien“¹⁵⁶⁴ postuliert wird, die als grundlegende, notwendige und allgemeingültige Verknüpfungsgesetzlichkeiten des menschlichen (Urteils-)Denkens aufgefaßt werden können, sodaß im Rahmen eines „reinen Ichs“ als der höchsten Einheit des (Selbst-)Bewußtseins (sog. „Transzendente Apperzeption“) der subjektive, kognitiv-kombinatorische Konstruktionscharakter des menschlichen Geistes herausgestellt wird. Erst diese angenommene notwendige und allgemeingültige Gesetzmäßigkeit des Verknüpfungs- bzw. Verbindungsvermögens des reinen Verstandes ist die Bedingung dafür, daß die Gegenstände nicht mehr (nur) in der Mannigfaltigkeit der sinnlichen Wahrnehmung vorgefunden werden, sondern es ermöglicht wird, daß von einem (transzendentalen) erkennenden Subjekt überhaupt erst anhand dieser apriorischen (Denk-)Formen die Gegenstände der Erfahrung verarbeitet, geordnet und gesetzt werden, wobei aber nur die erfahrungsunabhängigen Bedingungen von objektiver Erkenntnis analysiert werden.¹⁵⁶⁵

1562 Die sog. „vorkritische Periode“ erstreckt sich von den vierziger bis zu den siebziger Jahren des 18. Jhdts.

1563 Grundlegend s. I. KANT: Gesammelte Schriften. Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Reimer/De Gruyter. Berlin u.a. (1747-1803) 1902-2009.

Eingehend s. z.B. I. KANT (W. WEISCHEDEL (Hrsg.)): Kritik der reinen Vernunft 1. Werkausgabe Bd.

3. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1781) 1990 – I. KANT (W. WEISCHEDEL (Hrsg.)): Kritik der

reinen Vernunft 2. Werkausgabe Bd. 4. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1781) 1990.

Eingehend s. z.B. O. HÖFFE: Kants Kritik der reinen Vernunft. Die Grundlegung der modernen Philosophie. Beck. München. 2011.

Einführend s. z.B. O. HÖFFE: Immanuel Kant. 7. Auflage. Beck, München 2007 – R. SCRUTON: Kant. A very Short Introduction. Oxford University Press. Oxford. 2001.

1564 S. z.B. O. HÖFFE: Kants Kritik der reinen Vernunft. Die Grundlegung der modernen Philosophie. 4. Aufl. Beck. München. 2004. S. 117-31.

1565 S. z.B. O. HÖFFE: Immanuel Kant. 7. Auflage. Beck, München 2007. S. 55-56.

S. einführend z.B. J. HIRSCHBERGER: Geschichte der Philosophie. Band II: Neuzeit und Gegenwart. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991. S. 279-82, 291.

6.14 LOGISCHE FORM DER (SPRACH-)KOGNITION IM SINNE DES LOGISCHEN POSITIVISMUS DES WIENER KREISES NACH G. FREGE, B. RUSSELL, L. WITTGENSTEIN, M. SCHLICK, O. NEURATH, R. CARNAP, K. POPPER UND W. V.O. QUINE

In den zwanziger und dreißiger Jahren des 20. Jhdts hat sich eine Gruppe von Wissenschaftstheoretikern und Philosophen, z.B. vor allem der österreichische Nationalökonom und Philosoph Otto NEURATH¹⁵⁶⁶ und der Philosoph Rudolf CARNAP¹⁵⁶⁷, daneben auch der polnisch-U.S.-amerikanische Mathematiker und Logiker Alfred TARSKI¹⁵⁶⁸, der österreichisch-U.S.-amerikanische Mathematiker und Logiker Kurt GÖDEL¹⁵⁶⁹, der U.S.-amerikanische Logiker und Philosoph Willard Van Ornam QUINE¹⁵⁷⁰, der österreichisch-britische Philosoph Karl POPPER¹⁵⁷¹ u.v.a., unter der Leitung des Physikers und Philosophen Moritz

-
- 1566 Grundlegend s. O. NEURATH (R. HALLER / H. RUTTE (Hrsg.)): *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften* (Band 1 und 2). Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1981 – O. NEURATH (R. HALLER / R. KINROSS (Hrsg.)): *Gesammelte bildpädagogische Schriften* (Band 3). Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1991 – O. NEURATH (R. HALLER / U. HÖFER (Hrsg.)): *Gesammelte ökonomische, soziologische und sozialpolitische Schriften* (Band 4 und 5). Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1998. Eingehend s. z.B. O. NEURATH (R. HEGSELMANN (Hrsg.)): *Wissenschaftliche Weltauffassung, Sozialismus und logischer Empirismus*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. (1929) 1979. Einführend s. z.B. E. NEMETH: *Otto Neurath und der Wiener Kreis. Revolutionäre Wissenschaftlichkeit als politischer Anspruch*. Campus-Verlag. Frankfurt u.a. 1981.
- 1567 Eingehend s. z.B. R. CARNAP: *Der logische Aufbau der Welt*. Meiner. Hamburg (1928) 1998 – R. CARNAP: *Logische Syntax der Sprache*. Springer-Verlag. Wien. 1934 – R. CARNAP: *Formalization of Logic*. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1943. Einführend s. z.B. L. KRAUTH: *Die Philosophie Carnaps*. Springer. Wien u.a. 1970 – Th. MORMANN: *Rudolf Carnap*. Beck. München. 2000 – W. STEGMÜLLER: *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung*. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 351-428.
- 1568 Grundlegend s. A. TARSKI (St.R. GIVANT et al. (Eds.)): *Collected Papers*. Birkhäuser. Basel u.a. (1921-79) 1986. Eingehend s. z.B. A. TARSKI: *Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen*. *Studia Philosophica*. Vol. 1. 1936. S. 261-405 (wiederabgedruckt in: K. BERKA / L. KREISER (Hrsg.): *Logik-Texte. Kommentierte Auswahl zur Geschichte der modernen Logik*. Akademie-Verlag. Berlin. 1983. S. 445-546).
- 1569 Grundlegend s. K. GÖDEL (S. FEFERMAN u.a. (Eds.)): *Kurt Gödel. Collected Works*. Oxford University Press. New York u.a. 1986-2003. Eingehend s. z.B. K. GÖDEL: *Über die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls*. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. Bd. 37. 1930. S. 349-60 – K. GÖDEL: *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I*. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. Bd. 38. 1931. S. 173-98.
- 1570 Eingehend s. z.B. W.V.O. QUINE: *Mathematical Logic*. Harvard University Press. Cambridge/MA. (1940) 1976 – W.V.O. QUINE: *Word and Object*. MIT Press. Cambridge/MA. 1960 – W.V.O. QUINE: *Philosophy of Logic*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1970. Einführend s. z.B. H. LAUENER: *Willard Van Orman Quine*. Beck. München. 1982 – D. KOPPELBERG: *Die Aufhebung der analytischen Philosophie. Quine als Synthese von Carnap und Neurath*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1987 – W. STEGMÜLLER: *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung*. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 487-93. Zur Kritik am Logischen Empirismus s. z.B. W.V.O. QUINE: *From a Logical Point of View. Nine Logico-Philosophical Essays*. Harvard University Press. Cambridge/MA 1953.
- 1571 Grundlegend s. K.R. POPPER (W.W. BARTLEY III (Hrsg.)): *Gesammelte Werke in deutscher Sprache*. Mohr Siebeck. Tübingen. 2001-12. Eingehend s. z.B. K.R. POPPER: *Logik der Forschung*. 10. Aufl. Mohr. Tübingen. (1934) 1994 – K.R. POPPER: *Die offene Gesellschaft und ihre Feinde*. Band 1: *Der Zauber Platons*. 8. Aufl. Mohr Sie-

SCHLICK¹⁵⁷² in Wien getroffen, die daher als der sog. „Wiener Kreis“ (engl. „Vienna Circle“)¹⁵⁷³ bezeichnet wird, und die philosophische Position des sog. „Logischen Empirismus“ (engl. „logical empirism“), auch als sog. „Logischen Positivismus“ (engl. „logical positivism“)¹⁵⁷⁴ bezeichnet, vertreten hat, stark beeinflusst von den Arbeiten der Logiker, Mathematiker und Philosophen Gottlob FREGE¹⁵⁷⁵, Bertrand RUSSELL¹⁵⁷⁶ und Ludwig WITTGENSTEIN¹⁵⁷⁷, wonach die

-
- beck. Tübingen. 2003 – K.R. POPPER: Die offene Gesellschaft und ihre Feinde. Band 2: Falsche Propheten: Hegel, Marx und die Folgen. 8. Aufl. Mohr Siebeck. Tübingen. 2003.
Einführend s. z.B. H. KEUTH: Die Philosophie Karl Poppers. 2. Aufl. Mohr Siebeck. Tübingen. 2011.
- 1572 Grundlegend s. M. SCHLICK: Moritz Schlick Gesamtausgabe. Springer Verlag. Wien, New York. 2006-2009.
Eingehend s. z.B. M. SCHLICK: Allgemeine Erkenntnislehre. Springer-Verlag. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1918, 1925) 1979.
Einführend s. z.B. F.O. ENGLER / M. IVEN (Hrsg.): Moritz Schlick. Leben, Werk und Wirkung. Parerga. Berlin 2008.
- 1573 Eingehend s. z.B. Fr. STADLER: Studien zum Wiener Kreis. Ursprung, Entwicklung und Wirkung des Logischen Empirismus im Kontext. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1997.
Einführend s. z.B. M. GEIER: Der Wiener Kreis. 4. Aufl. Rowohlt. Reinbek bei Hamburg. 2004 – W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 351-428, 429-45, 445-86.
- 1574 Einführend s. z.B. V. KRAFT: Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. 2. Auflage. Springer-Verlag. Wien u.a. 1968 – R. HALLER: Neopositivismus. Eine historische Einführung in die Philosophie des Wiener Kreises. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt 1993.
S. auch J. SPECK (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Gegenwart I: Frege · Carnap · Wittgenstein · Popper · Russell · Whitehead. Mit einer Einführung in „Die Sprache der Logik“. 2. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1979 – J. SPECK (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit VI: Tarski · Reichenbach · Kraft · Gödel · Neurath. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1992 – J. SPECK (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Gegenwart III: Moore · Goodman · Quine · Ryle · Strawson · Austin. 2. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1984.
- 1575 Eingehend s. z.B. G. FREGE: Funktion und Begriff. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1891) 1994 S. 18-39 – G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1994 S. 40-65 – G. FREGE: Begriffsschrift: eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens. In: I. ANGELELLI (Hrsg.): G. Frege: Begriffsschrift und andere Aufsätze. 2. Aufl. Wiss. Buchgesellschaft. Darmstadt. (1879) 1964. S. VII-88 – G. FREGE: Über Begriff und Gegenstand. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. 7. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1994 S. 66-80 – G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966.
Einführend s. z.B. M. DUMMETT: Frege: Philosophy of Language. 2nd. Ed. Harvard University Press. Cambridge. 1981 – Fr. von KUTSCHERA: Gottlob Frege: Eine Einführung in sein Werk. De Gruyter. Berlin. 1989.
- 1576 Grundlegend s. B. RUSSELL: The Collected Papers of Bertrand Russell. George Allen & Unwin / Routledge. London u.a. 1984-2008.
Eingehend s. z.B. A.N. WHITEHEAD / B. RUSSELL: Principia Mathematica. Vol. 1-3. 2nd Ed. Cambridge University Press. Cambridge. (1910-13) 1927 – B. RUSSELL: The Philosophy of Logical Atomism. Open Court. LaSalle. 1918/19. In: J.G. SLATER (Ed.): Bertrand Russell. The Philosophy of Logical Atomism and other Essays. The Collected Papers. Vol. 8. 1914-19, 1986. PP. 157-244.
- 1577 Grundlegend s. L. WITTGENSTEIN (J. SCHULTE (neu durchges.)): Werkausgabe. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1989-95 – L. WITTGENSTEIN (M. NEDO (Hrsg.)): Wiener Ausgabe. Springer-Verlag. Wien u.a. 1993-2000.
Eingehend s. z.B. L. WITTGENSTEIN: Tractatus logico-philosophicus. In: Ludwig Wittgenstein. Werk-

grundlegende Aufgabe der Philosophie darin besteht, daß Aussagen über die Wirklichkeit oder über Werte nur anhand von strengen (einzel-)wissenschaftlichen (Überprüfungs-)Kriterien vorgenommen werden dürfen – in der Abkehr von der Beschäftigung mit einer sinnlosen spekulativen Metaphysik.¹⁵⁷⁸ M.a.W., es ist für die Vertreter des modernen Logischen Empirismus kennzeichnend, daß bei der Analyse von (einzel-)wissenschaftlichen und wissenschaftstheoretischen Erkenntnissen, zum einen, die Instrumente der modernen Logik herangezogen werden¹⁵⁷⁹, und, zum anderen, auf Grund von empirischen Kontrollmechanismen¹⁵⁸⁰, vor allem anhand von Beobachtungen, die Behauptungen über die Beschaffenheit der Welt – mit Bezug auf Erfüllung von bestimmten feststellbaren (Wahrheits-)Bedingungen – intersubjektiv überprüfbar sein sollen, und damit diese geforderte strenge Wissenschaftlichkeit gewährleistet werden soll, sodaß die Grundbegriffe, Grundaussagen und Denkverfahren der (Einzel-)Wissenschaften, d.h. also vor allem deren Methodik, geklärt werden können mit dem Ziel einer (physikalistischen) Einheitswissenschaft.¹⁵⁸¹ Die dabei verwendete sog. „logische Form“ (engl. „logical form“), z.B. im Rahmen der Analyse und Konstruktion von Theorien oder von künstlichen formalen Sprachsystemen, führt deshalb dazu, daß nur diejenigen Aussagen akzeptiert werden, die, entweder rein mit dem Instrumentarium der modernen Logik begründbar sind, die sog. „analytischen Aussagen“ (engl. „analytic propositions“), oder die sog. „empirischen Aussagen“ (engl. „empirical propositions“), die sich (bisher) an der Erfahrung bewährt haben (sog. „empiristisches Sinnkriterium“).¹⁵⁸²

ausgabe. Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus. Tagebücher 1914-16. Philosophische Untersuchungen. 7. Aufl. Suhrkamp Verlag. Berlin (1921) 1990. S. 7-86 – L. WITTGENSTEIN: Some Remarks on Logical Form. Aristotelian Society Supplementary. Vol. 9. Knowledge, Experience and Realism. 1929. PP. 162-71 (reprinted in: J.C. KLAGGE / A. NORDMANN (Eds.): Ludwig Wittgenstein. Philosophical Occasions 1912-51. Hackett Publishing Company. Indianapolis. 1993. PP. 29-35) – L. WITTGENSTEIN: Philosophische Untersuchungen. In: Ludwig Wittgenstein. Werkausgabe. Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus. Tagebücher 1914-16. Philosophische Untersuchungen. Suhrkamp Verlag. 7. Aufl. (1953) 1990.

Einführend s. z.B. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 526-61, 562-696 – E. STENIUS: Wittgenstein's Tractatus. A Critical Exposition of its Main Lines of Thought. Blackwell. Oxford. 1960 (dt.: Wittgensteins Traktat. Eine kritische Darlegung seiner Hauptgedanken. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1969).

1578 S. z.B. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 346-51.

1579 S. z.B. V. KRAFT: Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. 2. Auflage. Springer-Verlag. Wien u.a. 1968. S. 12-77.

1580 S. z.B. V. KRAFT: Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. 2. Auflage. Springer-Verlag. Wien u.a. 1968. S. 77-176.

1581 S. z.B. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 346-51, 351-62 – R. HALLER: Neopositivismus. Eine historische Einführung in die Philosophie des Wiener Kreises. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt 1993. S. 9-17 – Th. MORMANN: Rudolf Carnap. Beck. München. 2000. S. 106-25.

1582 S. z.B. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 351-62 – M. GEIER: Der Wiener Kreis. 4. Aufl. Rowohlt. Reinbek bei Hamburg. 2004. S. 106-15.

Dieses idealsprachliche Sprachverständnis kommt am besten in der (Isomorphie-)Theorie der Satzbedeutung und Satz Wahrheit¹⁵⁸³ L. WITTGENSTEIN's zum Ausdruck, basierend auf dem Kriterium der logischen Form, ergänzt von einer ontologischen Abbildtheorie¹⁵⁸⁴, wonach diese interne logische Struktur der Sprache einer externen Struktur der Wirklichkeit entspricht, sodaß die Bedingungen der Möglichkeit sinnvolles Denkens „damit abgesteckt sind durch das, was wir in einer logisch perfekten Sprache beschreiben können“ (sog. „transzendentaler Lingualismus“)¹⁵⁸⁵, m.a.W. die menschliche (Sprach-)Kognition ist determiniert durch die logische Form ihrer gedanklichen Sprachäußerungen im Rahmen einer allgemeinen Satzform.

1583 S. z.B. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 539-550.

1584 S. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 554-61, v.a. S. 555 mit Hinweis auf E. STENIUS: Wittgenstein's Tractatus. A Critical Exposition of its Main Lines of Thought. Blackwell. Oxford. 1960 (dt.: Wittgensteins Traktat. Eine kritische Darlegung seiner Hauptgedanken. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1969).

1585 S. W. STEGMÜLLER: Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987. S. 558.

6.15 VEKTORIELLE FORM DER (NEURO-)KOGNITION IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS

In den folgenden Kapiteln (Kap. 6.15.01-6.15.08) werden nun diejenigen Autoren vorgestellt, deren Positionen unter das sich entwickelnde Paradigma eines vektorbasierten systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus in der (Neuro-)Philosophie und Wissenschaftstheorie subsumiert werden können, wonach dessen Methoden, Modelle und Funktionsprinzipien, vor allem aus der Theorie der künstlichen neuronalen Netzwerke (Kap. 2.2, Kap. 4.2), auf bestimmte Themen in der (Neuro-)Philosophie und Wissenschaftstheorie angewendet werden, z.B. das Thema der (Begründung einer) konnektionistischen Neurosemantik, insbesondere der Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik, das der (Bindungs-)Mechanismus-Debatte und das des (geometrischen)¹⁵⁸⁶ distribierten Repräsentationsformats im (Neo-)Konnektionismus, oder das Thema des grundsätzlich dynamischen und selbstorganisierten Charakters der (Neuro-)Kognition:

¹⁵⁸⁶ S. Sh.-I. AMARI: Neuromanifolds and Information Geometry. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 751-57, v.a. P. 756 bezeichnet die von einem künstlichen neuronalen Netzwerk, z.B. von einer sog. „BOLTZMANN Maschine“, anhand von Vektoren erzeugte topologische Struktur im Systemzustandsraum mit dem Begriff der sog. „Informationsgeometrie“ (engl. „information geometry“). Zur sog. „BOLTZMANN Maschine“ s. z.B. A. ZELL: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verl. München, Wien. 1997. S. 207-15. Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.220.

6.15.01 NEUROPHILOSOPHY NACH P.M. CHURCHLAND UND P. SMITH CHURCHLAND

6.15.01.0 Seit der Mitte der achtziger Jahre des 20. Jhdts. begründeten die kanadischen Philosophen Paul M. CHURCHLAND¹⁵⁸⁷ und Patricia SMITH CHURCHLAND¹⁵⁸⁸ mit ihrem Forschungsprogramm der sog. „Neurophilosophie“ (engl. „neurophilosophy“)¹⁵⁸⁹, dargelegt in ihren Büchern: „NEUROPHILOSOPHY: TOWARD A UNIFIED SCIENCE OF THE MIND/BRAIN“¹⁵⁹⁰ und „A NEUROCOMPUTATIONAL PERSPECTIVE: THE NATURE OF MIND AND THE STRUCTURE OF SCIENCE“¹⁵⁹¹ aus den Jahren 1986 und 1989, eine neue Subdisziplin innerhalb der Philosophie, indem sie naturwissenschaftliche Theorien, z.B. aus der Neuroinformatik und den empirischen Neuro- und Kognitionswissenschaften, auf philosophische Themen und Probleme, insbesondere was die klassische sog. „Philosophie des Geistes“ (engl. „philosophy of mind“)¹⁵⁹² betrifft, angewendet haben.¹⁵⁹³ Dies führt u.a. zu der Position des

1587 Zur Person Paul M. CHURCHLAND's siehe die Website <http://philosophyfaculty.ucsd.edu/faculty/pchurchland/>.

1588 Zur Person Patricia SMITH CHURCHLAND's siehe die Website http://philosophyfaculty.ucsd.edu/faculty/pschurchland/index_hires.html.

1589 Grundlegend s. z.B. P. SMITH CHURCHLAND: Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986, v.a. PP. 403-79 mit Hinweis auf P.M. CHURCHLAND: Cognitive Neurobiology: A Computational Hypothesis for Laminar-Cortex. Biology and Philosophy. Vol. 1. 1986. PP. 25-51 – P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989, v.a. PP. 153-96, 197-230, 231-53 – P. SMITH CHURCHLAND: Brain-Wise: Studies in Neurophilosophy. MIT Press. Cambridge/MA. 2002 – P.M. CHURCHLAND: Neurophilosophy at Work. Cambridge University Press. New York. 2007.

Einführend s. z.B. P.M. CHURCHLAND: The Engine of Reason, the Seat of the Soul. A Philosophical Journey into the Brain. The MIT Press. Cambridge/Mass. 1995.

Einen einführenden Überblick geben z.B. W. HIRSTEIN: On the Churchlands. Thomson Wadsworth. Toronto. 2004.

Zum Begriff der sog. „Neurophilosophie“ im allgemeinen s. z.B. G. NORTHOFF: Was ist Neurophilosophie? Neurophilosophie zwischen Neurowissenschaften und Philosophie. In: C. KAMINSKY / O. HALLICH (Hrsg.): Verantwortung für die Zukunft. Zum 60. Geburtstag von Dieter Birnbacher. LIT Verlag. Berlin. 2006. S. 251-68 – G. NORTHOFF: Neurophilosophie – ein neuer Ansatz in der Philosophie. Information Philosophie. 2001. Bd. 1. S. 24-34.

1590 S. P. SMITH CHURCHLAND: Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986.

1591 S. P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989.

1592 S. einführend z.B. A. BECKERMANN: Analytische Einführung in die Philosophie des Geistes. 3. Aufl. De Gruyter. Berlin u.a. 2008 – M. PAUEN: Grundprobleme der Philosophie des Geistes. Eine Einführung. 3. Aufl. Fischer Taschenbuchverlag. Frankfurt. 2002 – I. RAVENSCROFT: Philosophie des Geistes. Reclam. Stuttgart. 2008.

1593 Sie stützen sich dabei u.a. vor allem auf die sog. „Tensor Network Theory“ von A. PELLIONISZ und R. LLINÁS.

S. hierzu z.B. A. PELLIONISZ / R. LLINÁS / D.H. PERKEL: A Computer Model of the Cerebellar Cortex of the Frog. Neuroscience. Vol. 2. PP. 19-36 – A. PELLIONISZ / R. LLINÁS: Brain Modelling by Tensor Network Theory and Computer Simulation. The Cerebellum: Distributed Processor for Predictive Coordination. Neuroscience. Vol. 4. 1979. PP. 323-48 – A. PELLIONISZ / R. LLINÁS: Tensor Network Theory of the Metaorganization of Functional Geometries in the Central Nervous System. Neuroscience. Vol. 16. 1985. PP. 245-73.

Zum allgemeinen Bindungsproblem s. z.B. P. SMITH CHURCHLAND: Toward a Neurobiology of

sog. „eliminativen Materialismus“ (engl. “eliminative materialism”)¹⁵⁹⁴, wonach die Begriffe und Vorstellungen der Alltagspsychologie (engl. “folk psychology”) zum großen Teil durch eine neuro- und kognitionswissenschaftliche Beschreibung des menschlichen Geistes zu ersetzen seien.

6.15.01.1 Die Kernthese der Neurophilosophie besteht in der sog. „Zustandsraum-Semantik“ (engl. “State-Space Semantics (SSS)”) ¹⁵⁹⁵ nach P.M. CHURCHLAND, die, basierend auf einer (Kognitions-)Theorie des mentalen Konzepts i.S. des Konnektionismus (“Parallel Distributed Processing (PDP) account of mind”¹⁵⁹⁶), den Gehalt eines (mentalen) semantischen Konzepts mit einem kategorialen (statistischen) Prototypen identifiziert¹⁵⁹⁷, kodiert als

Mind. In: R.R. LLINÁS / P. SMITH CHURCHLAND (Eds.): The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 297-300.

1594 S. hierzu z.B. P. SMITH CHURCHLAND: Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986. PP. 395-99, v.a. P. 396 – P. SMITH CHURCHLAND: Toward a Neurobiology of Mind. In: R.R. LLINÁS / P. SMITH CHURCHLAND (Eds.): The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 281-303, v.a. PP. 284-297.

1595 Grundlegend s. z.B. P.M. CHURCHLAND: Some Reductive Strategies in Cognitive Neurobiology. Mind. Vol. 95. 1986. PP. 279-309, v.a. PP. 299-306 – P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. PP. 77-110, 122-25, 163-71, 200-18 – P.M. CHURCHLAND: Neurosemantics: On the Mapping of Minds and the Portrayal of Worlds. In: K.E. WHITE (Ed.): The Emergence of the Mind. Proceedings of the International Symposium. Milan. Montedison the Fondazione Carlo Erba. 1993. PP. 117-47 – P.M. CHURCHLAND: State-Space Semantics and Meaning Holism. Philosophy and Phenomenological Research. Vol. 53. 1993. PP. 667-72 – P.M. CHURCHLAND: Outer Space and Inner Space: The New Epistemology. Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association. Vol. 76. 2002. PP. 25-48 – P. SMITH CHURCHLAND: Brain-Wise: Studies in Neurophilosophy. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. PP. 273-319, v.a. PP. 290-302.

Einführend s. z.B. J.J. PRINZ: Empiricism and State-Space Semantics. In: B.L. KEELEY (Ed.): Paul Churchland. Cambridge University Press. Cambridge. 2006. PP. 88-90 – C. GAUKER: A Critique of the Similarity Space Theory of Concepts. Mind and Language. Vol. 22. 2007. PP. 318-19 – Fr. CALVO GARZÓN: Connectionist Semantics and the Collateral Information Challenge. Mind & Language. Vol. 18. 2003. P. 80 – A. LAAKSO / G. COTTRELL: Churchland on Connectionism. In: B.L. KEELEY (Ed.): Paul Churchland. Cambridge University Press. Cambridge. 2006. PP. 117-18.

Eine allgemeinverständliche Einführung bietet z.B. P.M. CHURCHLAND: Die Seelenmaschine. Eine philosophische Reise ins Gehirn. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg u.a. 2001. S. 42-66, 67-113, 114-43.

S. auch Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 72-79, v.a. S. 78.

1596 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: The Neural Representation of the Social World. In: L. MAY / M. Friedman / A. CLARK (Eds.): Mind and Morals: Essays on Cognitive Science and Ethics. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. P. 107.

1597 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. PP. 167, 168, 204, 218-21, v.a. P. 206: “Any prototype representation is in fact a specific vector (that is, a pattern of activations) across the network’s hidden units, but we may conceive of it more graphically as a specific point or small volume in an abstract state space of possible activation vectors, since that portrayal highlights its geometrical relations with representations of distinct prototypes, and with activation vectors that are variously close to (that is, similar to) the prototype vector.

(...) a single prototypical point or activation vector across the hidden units represents a wide range of quite different possible sensory activation patterns at the input layer: it represents the extended family of relevant (but individually perhaps nonnecessary) features that collectively unite the relevant class of stimuli into a single kind. Any member of that diverse class of stimuli will

eine (Unter-)Menge von Vektoren in einem multidimensionalen (System-)Zustandsraum (engl. "(system) state space"), die denselben abgrenzbaren (Vektor-)Unterraum einnehmen, d.h. ein semantisches Konzept wird definiert anhand seiner geometrischen Position in einem n -dimensionalen Hyperraum, m.a.W. diese multidimensionale geometrische Partition, bestehend aus einer Population von Vektoren, repräsentiert als ein sog. „Cluster“¹⁵⁹⁸ i.S. einer „Punktwolke“ im Systemzustandsraum, entspricht einem Prototypen für eine semantische Kategorie, beruhend auf der gemittelten Ähnlichkeit der entsprechenden Eingabemuster: Die „Position“ einer Vektorkoordinate im Systemzustandsraum, definiert als eine Konfiguration von Vektorkomponenten i.S. eines numerischen Werts in der jeweiligen Dimension, ist dabei gegeben anhand der (numerischen) (Aktivierungs-)Vektoren der (versteckten) Neuronen (engl. "hidden units")¹⁵⁹⁹, die sich ergeben, wenn das künstliche neuronale Netzwerk jeweils aus einer Menge von möglichen Eingabemustern eine entsprechende Untermenge mit hinreichend ähnlichen Datenvektoren herausgreift, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit einem bestimmten von n verschiedenen möglichen Ausgabemustern zugewiesen wird und dadurch kategorisiert wird (s. Graphik.49).¹⁶⁰⁰

activate the entire prototype vector at the hidden units. Also, any input-layer stimulus that is relevantly *similar* to the members of that class, in part or in whole, will activate a vector at the hidden units that is fairly close, in state space, to the prototype vector.

In dynamical terms, the prototype position is called an 'attractor.'

S. auch P.M. CHURCHLAND: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. P. 210: "Explanatory understanding consists in the activation of a specific prototype vector in a well-trained network. It consists in the apprehension of the problematic case as an instance of a general type, a type for which the creature has a detailed and well-informed representation."

Im Rahmen seines sog. "Prototype-Activation Model of Explanation" diskutiert P.M. CHURCHLAND: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. PP. 209-18 verschiedene Typen von Prototypvektoren (engl. "prototype vectors"), z.B. "property-cluster prototypes", "etiological prototypes", "practical prototypes", "superordinate prototypes", "social-interaction prototypes" und "motivational prototypes".

1598 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.21.

1599 Siehe die Ausführungen in Kap. 2.211, 2.221.

1600 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: *State-Space Semantics and Meaning Holism*. *Philosophy and Phenomenological Research*. Vol. 53. 1993. PP. 670-71: "Experience with artificial networks has taught us, however, that the many interlocking sub-features detected at lower levels – whose collective impact at higher levels ultimately produces the activation vector for 'kitten' – are rarely the features that one would list in a definition of 'kitten' (e.g., small, furry, four-legged, young, feline). More typically they will be diffuse, opaque, inarticulable features whose only obvious significance is that, in conjunction with hundreds of other similarly diffuse coding features passing through the labyrinth of the massively parallel network, they occasionally participate in the selective activation of the higher-level 'kitten' vector. This comparative 'semantic opacity' of the computational process reflects in part the difficulty of the processing task. But it also reflects the fact that multi-layered nonlinear neural networks are typically *not* computing mere Boolean combinations among their sensory inputs. Such networks can approximate the computation of any computable function, including highly esoteric functions. This feature is essential to their celebrated successes.

In the event, within both Patricia and me there is activated, at some fairly high-level population of hidden units, a vector that represents kittens, that has the content 'kitten.' What makes each

Die Kritik von J. FODOR und E. LEPORE¹⁶⁰¹ aufgreifend, daß die Definition eines Ähnlichkeitsmaßes von semantischer Information Schwierigkeiten unterliege, sobald man zwei künstliche neuronale Netzwerke mit verschiedenen Architekturen, z.B. was die Anzahl der Neurone betrifft, miteinander vergleiche, identifizierte daraufhin P.M. CHURCHLAND¹⁶⁰², sich stützend auf eine Studie von A. LAAKSO und G. COTTRELL (sog. "partitioning-of-activation-space view")¹⁶⁰³, nun die Ähnlichkeit des Gehalts eines semantischen Konzepts nicht mehr anhand der absoluten Position der Vektoren bzw. des Clusters von Vektoren, sondern „nur“ anhand der relativen Position der Partitionen des Zustandsraums zueinander.

vector, Patricia's and mine, a 'kitten' vector is not the identity of our respective patterns of neuronal activation across the hidden layer (these are likely quite different), nor the semantic identity of the constituting dimensions in her hidden-unit population and in mine (their diffuse 'contents' may well be quite idiosyncratic). What gives this vector the content 'kitten' is the overall role that this vector plays in the larger cognitive and motor economy of which it is an interlocking part. Thanks to an almost magical process of sensory filtering and vector completion, that prototype vector is typically activated in me by any one of a wide range of possible sensory impacts on me by a kitten. But much more importantly, that prototype vector has rich causal and computational *sequelae* of its own. Because of its own transformational significance to the extensive and well-trained network *downstream* from that prototype vector, it prompts a family of kitten-specific perceptual expectations and prepares one to engage in a family of kitten-specific behaviors.

It is this downstream aspect of the vector's computational role that is so vitally important for reckoning sameness of cognitive content across individuals, or across cultures."

(...)

"This returns us to a robust and recognizable form of meaning holism: it is conceptual role that counts. What is novel in the state-space or vector-coding approach is the fresh account it provides of what our cognitive economy actually consists in. Instead of a rule-governed dance of propositional attitudes, we are presented with high-dimensional activation vectors being transformed into new vectors by virtue of passing through a series of well-trained matrices of synaptic connections."

1601 S. J. FODOR / E. LEPORE: *Holism: A Shopper's Guide*. Blackwell. Cambridge. 1992. PP. 187-207, v.a. PP. 197-202 – J.A. FODOR / E. LEPORE: *Paul Churchland and State Space Semantics*. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 145-62 – J. FODOR / E. LEPORE: *All at Sea in Semantic Space: Churchland on Meaning Similarity*. *Journal of Philosophy*. Vol. 96. 1999. PP. 381-403.

S. hierzu die Kritik von P.M. CHURCHLAND / P. SMITH CHURCHLAND: *Fodor and Lepore: State-Space Semantics and Meaning Holism*. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 272-77 und P.M. CHURCHLAND / P. SMITH CHURCHLAND: *Second Reply to Fodor and Lepore*. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 278-83.

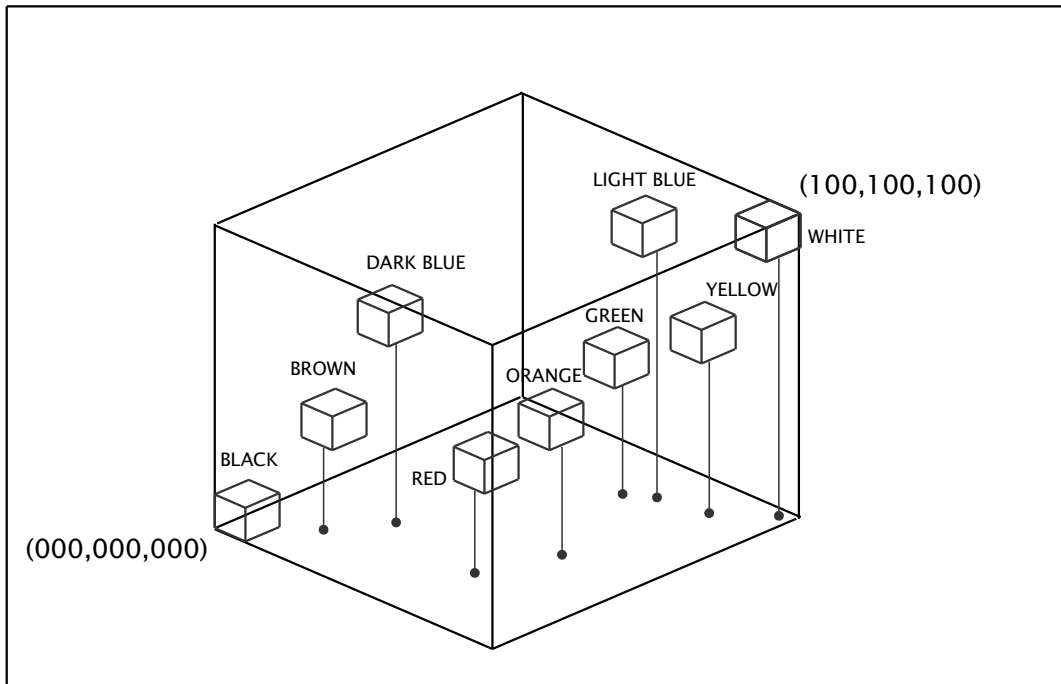
Einführend s. z.B. N. SHEA: *Content and its Vehicles in Connectionist Systems*. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 261-64.

1602 S. P.M. CHURCHLAND: *Conceptual Similarity across Sensory and Neural Diversity: The Fodor/Lepore Challenge Answered*. *The Journal of Philosophy*. Vol. 95. 1998. PP. 5-32.

Zu den weiteren Kritiken dazu s. Kap. 6.437.3.

1603 S. A. LAAKSO / G. COTTRELL: *Content and Cluster Analysis. Assessing Representational Similarity in Neural Systems*. *Philosophical Psychology*. Vol. 13. 2000. PP. 47-76, v.a. PP. 56-58.

Einführend s. z.B. N. SHEA: *Content and its Vehicles in Connectionist Systems*. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 258-61.



Graphik.49: Schematisches Diagramm eines vereinfachten Farbzustandsraums (angelehnt an P.M. CHURCHLAND: A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989. P. 104), dessen Vektorkodierungsstrategie – prinzipiell – auch auf eine „Zustandsraum-Semantik“ (engl. “State-Space Semantics”) übertragen werden kann. Eine neurobiologisch plausible Version der Farbwahrnehmung beim Menschen – auf der Basis der sog. „Gegenfarb(-en)-theorie“ i.S. K.E.K. HERING's (engl. “theory of contrasting colors”) – wird in P.M. CHURCHLAND: Die Seelenmaschine. Eine philosophische Reise ins Gehirn. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 2001. S. 28-30 dargestellt.

6.15.02 (CONNECTIONISTIC) DYNAMICAL MECHANISTIC APPROACH NACH W. BECHTEL

6.15.02.0 Seit der zweiten Hälfte der achtziger Jahre des 20. Jhdts. hat sich der U.S.-amerikanische Philosoph und Wissenschaftstheoretiker William BECHTEL¹⁶⁰⁴ eingehend mit dem Konnektionismus auseinandergesetzt¹⁶⁰⁵, z.B. mit P.M. CHURCHLAND's "Connectionist Philosophy of Science"¹⁶⁰⁶, D.E. RUMELHART's und J.L. McCLELLAND's "Past Tense Acquisition Model"¹⁶⁰⁷, G.E. HINTON's "Kinship Knowledge and Reasoning Model"¹⁶⁰⁸, L. SHASTRI's und V. AJJANAGADDE's "Backward-Reasoning System SHRUTI"¹⁶⁰⁹, J.L. ELMAN's "Simple Recurrent Network"¹⁶¹⁰, J. POLLAK's "Recursive Auto-Associative Memory (RAAM)"¹⁶¹¹ und T. KOHONEN's "Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)"¹⁶¹², vor allem mit den Büchern, zusammen geschrieben mit der kognitiven und Entwicklungspsychologin Adele ABRAHAMSEN: "CONNECTIONISM AND THE MIND: AN INTRODUCTION TO PARALLEL PROCESSING IN NETWORKS"¹⁶¹³ aus dem Jahr 1991 und "CONNECTIONISM AND THE MIND:

¹⁶⁰⁴ Zur Person William BECHTEL's siehe die Website <http://mechanism.ucsd.edu/>.

¹⁶⁰⁵ Grundlegend s. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*. Blackwell Publishers. Oxford. 1991 – W. BECHTEL: *Currents in Connectionism. Minds and Machines*. Vol. 3. 1993. PP. 125-53 – W. BECHTEL: *Natural Deduction in Connectionist Systems*. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 433-63 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002 – W. BECHTEL: *Representations: From Neural Systems to Cognitive Science*. In: W. BECHTEL et al. (Ed.): *Philosophy and the Neurosciences*. Blackwell. Oxford. 2001.

Einführend s. z.B. W. BECHTEL: *Connectionism and the Philosophy of Mind: An Overview*. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 30-59.

S. auch W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Blackwell Publisher. Malden/MA., Oxford/UK. 1998.

¹⁶⁰⁶ S. W. BECHTEL: *What should a Connectionist Philosophy of Science Look Like?* In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 121-44.

¹⁶⁰⁷ S. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 176-204.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.26.

¹⁶⁰⁸ S. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 204-209.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.26.

¹⁶⁰⁹ S. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 166-70.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 5.1.05.

¹⁶¹⁰ S. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 178-90.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.25.02.

¹⁶¹¹ S. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 170-78.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 2.26.

¹⁶¹² S. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 212-17, 223-28.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.

¹⁶¹³ S. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*. Blackwell Publishers. Oxford. 1991.

PARALLEL PROCESSING, DYNAMICS, AND EVOLUTION IN NETWORKS"¹⁶¹⁴ aus dem Jahr 2002, wobei sie auch den dynamischen Aspekt von künstlichen neuronalen Netzen hervorheben.¹⁶¹⁵

6.15.02.1 Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrzehnts widmet sich W. BECHTEL mit seinem sog. "Dynamical Mechanistic Approach"¹⁶¹⁶ der Analyse der komplexen Dynamik in einer Vielzahl von (neuro-)biologischen Mechanismen anhand einer dynamisch-mechanistischen Erklärung (engl. "dynamic mechanistic explanations")¹⁶¹⁷, wonach diese Mechanismen zuerst einer Dekomposition in deren (System-)Komponenten und (System-)Operationen unterzogen werden, um anschließend in komputationalen Modellen, in denen die Variablen bzw. Terme der Differentialgleichungen den

S. auch W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002

1614 S. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002.

1615 S. z.B. D.M. KAPLAN / W. BECHTEL: *Dynamical Models: An Alternative or Complement to Mechanistic Explanations*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 3. 2011. PP. 438-44 – A. ABRAHAMSEN / W. BECHTEL: *Phenomena and Mechanisms: Putting the Symbolic, Connectionist, and Dynamical Systems Debate in Broader Perspective*. In: R. STANTON (Ed.): *Contemporary Debates in Cognitive Science*. Basil Blackwell. Oxford. 2006. PP. 159-85 – W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Chap. 8. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 235-81 – W. BECHTEL: *Representations and Cognitive Explanations: Assessing the Dynamicist Challenge in Cognitive Science*. *Cognitive Science*. Vol. 22. 1998. PP. 295-318.

1616 Grundlegend s. z.B. W. BECHTEL: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. Routledge. 2008 – A. ABRAHAMSEN / W. BECHTEL: *From Reactive to Endogenously Active Dynamical Conceptions of the Brain*. In: T. REYDON / K.S. PLAISANCE: *Philosophy of Behavioral Biology*. Springer Science+Media B.V. Dordrecht. 2012. PP. 329-66, v.a. PP. 332-35 – W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Thinking Dynamically about Biological Mechanisms: Networks of Coupled Oscillators*. *Foundations of Science*. Doi: 10.1007/s10699-012-9301-z. 2012. PP. 1-19 – W. BECHTEL: *Referring to Localized Cognitive Operations in Parts of Dynamically Active Brains*. In: A. RAFTOPOULOS / P. MACHAMER (Eds.): *Perception, Realism and the Problem of Reference*. Cambridge University Press. Cambridge. 2012. PP. 262-84 – D.M. KAPLAN / W. BECHTEL: *Dynamical Models: An Alternative or Complement to Mechanistic Explanations*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 3. 2011. PP. 438-44 – W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Understanding the Brain as an Endogenously Active Mechanism*. In: St. OHLSSON / R. CATRAMBONE (Eds.): *Cognition in Flux*. *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Portland, Oregon, August 11-14, 2010. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2010. PP. 31-36 – W. BECHTEL: *Mental Mechanisms: What are the Operations?* In: Br.G. BARA / L. BARSALOU / M. BUCCIARELLI (Eds.): *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. July 21-23 Stresa, Italy. 2005. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2005. PP. 208-13.

Zum Begriff des sog. „Mechanismus“ (engl. "Mechanism") s. z.B. C.F. CRAVER / W. BECHTEL: *Mechanism and Mechanistic Explanation*. In: S. SARKAR / J. PFEIFER (Eds.): *Philosophy of Science: An Encyclopedia*. Routledge. New York. 2006. PP. 469-78.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.2, 7.

1617 S. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Dynamic Mechanistic Explanation: Computational Modeling of Circadian Rhythms as an Exemplar for Cognitive Science*. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. Vol. 1. 2010. PP. 321-33 – W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Complex Biological Mechanisms: Cyclic, Oscillatory, and Autonomous*. In: C.A. HOOKER (Ed.): *Philosophy of Complex Systems*. *Handbook of the Philosophy of Science*. Vol. 10. Elsevier. New York. 2011. PP. 295-318 – A. ABRAHAMSEN / W. BECHTEL: *From Reactive to Endogenously Active Dynamical Conceptions of the Brain*. In: T. REYDON / K.S. PLAISANCE: *Philosophy of Behavioral Biology*. Springer Science+Media B.V. Dordrecht. 2012. PP. 331, 358-61.

Attributen dieser Komponenten und Operationen entsprechen, wieder rekonstruiert zu werden.¹⁶¹⁸ Ein Anwendungsgebiet betrifft nun auch die Untersuchung von (neuronalen) Netzwerken, bestehend aus gekoppelten Oszillatoren und deren Synchronisationen¹⁶¹⁹, z.B. Bezug nehmend auf die Forschungsarbeiten von N. KOPELL und B. ERMENTROUT¹⁶²⁰, A.T. WINFREE¹⁶²¹ und die sog. "Small-World Architectures" von D. WATTS und S. STROGATZ¹⁶²².
6.15.02.2 Desweiteren hat sich W. BECHTEL eingehend auch mit der Produktivitäts-, Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik beschäftigt¹⁶²³ unter Einschluß der (Variablen-)Bindungsproblematik.¹⁶²⁴

-
- 1618 S. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: Thinking Dynamically about Biological Mechanisms: Networks of Coupled Oscillators. *Foundations of Science*. Doi: 10.1007/s10699-012-9301-z. 2012. P. 1.
- 1619 S. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: Thinking Dynamically about Biological Mechanisms: Networks of Coupled Oscillators. *Foundations of Science*. Doi: 10.1007/s10699-012-9301-z. 2012. PP. 12-15.
- 1620 S. z.B. B. ERMENTROUT / N. KOPELL: Frequency Plateaus in a Chain of Weakly Coupled Oscillators. In: J. SMOLLER (Ed.): *Nonlinear Partial Differential Equations*. American Mathematical Society. Providence/RI. 1982. PP. 401-404 – N. KOPELL / B. ERMENTROUT: Symmetry and Phaselocking in Chains of Weakly Coupled Oscillators. *Communications on Pure and Applied Mathematics*. Vol. 39. 1986. PP. 623-60.
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.33.
- 1621 S. z.B. A.T. WINFREE: Biological Rhythms and the Behavior of Populations of Coupled Oscillators. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 16. 1967. PP. 15-42.
- 1622 S. z.B. D. WATTS / S. STROGATZ: Collective Dynamics of Small Worlds. *Nature*. Vol. 393. 1998. PP. 440-42.
S. auch S.H. STROGATZ: Exploring Complex Networks. *Nature*. Vol. 410. 2001. PP. 268-76.
- 1623 S. z.B. W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks. Blackwell Publishers. Oxford. 1991. PP. 210-54 – W. BECHTEL: The Case for Connectionism. In: W.G. LYCAN (Ed.): *Mind and Cognition. An Anthology*. 2nd Ed. Blackwell Oxford/UK. 1999. PP. 153-70, v.a. PP. 157-63 – W. BECHTEL: Das Ende der Verbindung zwischen dem mentalen Bereich und der Sprache. Eine konnektionistische Perspektive. In: A. ELEPFANDT / G. WOLTERS (Hrsg.): *Denkmaschinen? Interdisziplinäre Perspektiven zum Thema Gehirn und Geist*. Universitätsverlag Konstanz. Konstanz. 1993. S. 117-52.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.4.
- 1624 S. z.B. W. BECHTEL / A.A. ABRAHAMSEN: Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002. PP. 156-99, 200-34 – W. BECHTEL: Representations: From Neural Systems to Cognitive Science. In: W. BECHTEL et al. (Ed.): *Philosophy and the Neurosciences*. Blackwell. Oxford. 2001 – W. BECHTEL: The Case for Connectionism. In: W.G. LYCAN (Ed.): *Mind and Cognition. An Anthology*. 2nd Ed. Blackwell. Oxford/UK. 1999. PP. 153-70 – W. BECHTEL: Embodied Connectionism. In: D. JOHNSON / C.E. ERNELING: *The Future of the Cognitive Revolution*. Oxford University Press. Oxford. 1997. PP. 187-208 – W. BECHTEL: Natural Deduction in Connectionist Systems. *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 433-63.

6.15.03 (NONCOMPUTABLE) DYNAMICAL COGNITION APPROACH NACH T. HORGAN UND J. TIENSON

6.15.03.0 Seit der zweiten Hälfte der achtziger Jahre des 20. Jhdts. haben sich die U.S.-amerikanischen Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Terry HORGAN¹⁶²⁵ und John TIENSON¹⁶²⁶ mit dem Konnektionismus auseinandergesetzt¹⁶²⁷, vor allem in ihrem Buch: "CONNECTIONISM AND THE PHILOSOPHY OF PSYCHOLOGY"¹⁶²⁸ aus dem Jahr 1996, wobei sie besonders betonen, daß die konnektionistischen Modelle grundsätzlich als dynamische (kognitive) Systeme betrachtet werden sollten.¹⁶²⁹

6.15.03.1 Eine zentrale Kernthese besteht dabei – unter Berufung auf P. SMITH CHURCHLAND's "Neurophilosophy"¹⁶³⁰, P.M. CHURCHLAND's "State-Space Semantics (SSS)"¹⁶³¹, D.J. AMIT's "Attractor Neural Network (ANN) Model"¹⁶³² und W.J. FREEMAN's "K0-KV (Katchalsky) Set Attractor Network Models"¹⁶³³ sowie der kognitionswissenschaftlichen Methodik D. MARR's¹⁶³⁴ – darin, daß das menschliche kognitive System zu komplex sei, um anhand von „berechenbaren kognitiven Übergangsfunktionen“ (engl. "computable cognitive-transition functions")¹⁶³⁵ i.S. der klassischen Symboltheorie beschrieben werden zu können, sondern anhand eines mathematischen, aber nicht-algorithmischen dynamischen Systems i.S. einer „hochdimensionalen Aktivierungslandschaft“ (engl. "high-dimensional activation land-

1625 Zur Person Terry HORGAN's siehe die Website <http://www.u.arizona.edu/~thorgan/>.

1626 Zur Person John TIENSON's siehe die Website <http://www.memphis.edu/philosophy/bios/-tienison.php>.

1627 Grundlegend s. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43 – T. HORGAN / J. TIENSON: Structured Representations in Connectionist Systems? In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 195-228 – T. HORGAN / J. TIENSON: Settling into a New Paradigm. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 241-60 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 305-45.

Einführend s. z.B. J. TIENSON: Introduction. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 1-29 – J. TIENSON: An Introduction to Connectionism. Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. 1988. PP. 1-16.

S. auch T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. 1988 – T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991.

1628 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996.

1629 S. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 45-69, v.a. PP. 46-50 – T. HORGAN / J. TIENSON: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43, v.a. PP. 30-33 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 316-20.

1630 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.01.

1631 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.01.

1632 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.2.06.

1633 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.2.01.

1634 Siehe die Ausführungen in Kap. 1.13.

1635 S. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 62, 63.

scape")¹⁶³⁶, die selbst wiederum in einer konnektionistischen neuronalen Netzarchitektur physikalisch implementiert ist (sog. "(Noncomputable) Dynamical Cognition (NDC) Approach"¹⁶³⁷).

6.15.03.2 Die Autoren kritisieren, wie bereits erwähnt¹⁶³⁸, ferner die Verwendung von sog. „harten Regeln“ (engl. "hard rules")¹⁶³⁹ zur Manipulation und Transformation von Symbolrepräsentationen und heben dagegen die Vorzüge der konnektionistischen Modelle mit ihren sog. „weichen Gesetzen“ (engl. "soft laws")¹⁶⁴⁰ im Rahmen einer psychologischen Theorie hervor, die einen alternativen Typ von kausaler Interaktion erzeugen würden.¹⁶⁴¹

6.15.03.3 Desweiteren haben sich T. HORGAN und J. TIENSON eingehend auch mit der (Variablen-)Bindungsproblematik der Tensorprodukt-Repräsentation (engl. "Tensor Product Representation (TPR)") P. SMOLENKY's beschäftigt.¹⁶⁴²

¹⁶³⁶ S. z. B. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 48, 62, 65 – T. HORGAN / J. TIENSON: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. P. 319.

¹⁶³⁷ S. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 55-63, v.a. PP. 56-57, PP. 63-69, v.a. PP. 63-64: "This conception of cognition, which can be called Noncomputable Dynamical Cognition, is the approach we favor. (For brevity, henceforth we will call this view 'Dynamical Cognition'). It is an instantiation of the general three-level framework for cognitive science (...), involving the key idea that the mental and physical levels are mediated by a mathematical level of description – a level which is thus the locus of nature's cognitive design. Briefly, the alternative framework may be sketched as follows.

Cognitive-State Transitions At the level of the mental *qua* mental, the cognitive system has general dispositions to evolve from one total cognitive state to another in content-appropriate ways. The cognitive-state transitions need not (and in general, do not) conform to a tractably computable transition function. The system's cognitive dispositions are systematizable via psychological laws that contain *ceteris paribus* clauses adverting to psychology-level exceptions (...). These laws need not be (and, in general, cannot be) refined into general psychological laws lacking psychology-level exceptions.

Mathematical-State Transitions Cognition is mathematically subserved by a dynamical system, under a realization relation linking total cognitive states to points in the dynamical system's state space. Although some dynamical systems also are mathematically describable as conforming to an algorithm over representations, the mathematical states and state transitions subserving cognition need not (and, in general, do not) constitute an algorithm that computes cognitive transitions.

Physical Implementation At the physical level, the dynamical system is subserved by a neural network of some sort. We here adopt the working hypothesis that connectionist networks constitute appropriate physical devices for implementing the relevant kinds of dynamical systems. Points in the state space of the dynamical system are realized by total activation patterns in the associated network, each dimension of the state space corresponding to the activation value of a corresponding node in the network. The dynamical system is thus a high-dimensional activation landscape."

S. auch S. T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy of Psychology. MIT Press. 1996. PP. 145-71.

¹⁶³⁸ Siehe die Ausführungen in Kap. 2.242.2.

¹⁶³⁹ Siehe die Ausführungen in Kap. 2.242.2, Fn. 402.

¹⁶⁴⁰ Siehe die Ausführungen in Kap. 2.242.2, Fn. 405.

¹⁶⁴¹ Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.242.2, Fn. 407.

¹⁶⁴² S. z.B. T. HORGAN / J. TIENSON: Structured Representations in Connectionist Systems? In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 195-228, v.a. PP. 206-18 – T. HORGAN / J. TIENSON: Connectionism and the Philosophy

6.15.04 CONNECTIONISTIC MICROFUNCTIONALISM NACH A. CLARK

6.15.04.0 Seit dem Ende der achtziger Jahre des 20. Jhdts hat sich der britische Philosoph Andy CLARK¹⁶⁴³ mit dem Konnektionismus beschäftigt¹⁶⁴⁴, vor allem in seinen Büchern: "MICROCOGNITION: PHILOSOPHY, COGNITIVE SCIENCE, AND PARALLEL DISTRIBUTED PROCESSING"¹⁶⁴⁵ aus dem Jahr 1989 und "ASSOCIATIVE ENGINES. CONNECTIONISM, CONCEPTS, AND REPRESENTATIONAL CHANGE"¹⁶⁴⁶ aus dem Jahr 1993.

6.15.04.1 Ein zentrales Thema darin betrifft die Auseinandersetzung der konnektionistischen Literatur mit der Frage, ob und wie die menschliche Kognition auf strukturierten internen Repräsentationen beruht¹⁶⁴⁷, wobei er – unter Berufung auf P.M. CHURCHLAND's "State-Space Semantics (SSS)"¹⁶⁴⁸, P. SMOLENSKY's "Tensor Product Representation (TPR)"¹⁶⁴⁹, T. PLATE's "Holographic Reduced Representations (HRRs)"¹⁶⁵⁰ und T. van GELDER¹⁶⁵¹ – die Position vertritt¹⁶⁵², daß diese konnektionistischen Techniken mit ihrer verteilten

1643 Zur Person Andy CLARK's siehe die Website <http://www.philosophy.ed.ac.uk/people/clark/publications.html>.

1644 Grundlegend s. z.B. A. CLARK: Connectionism, Competence, and Explanation. *British Journal of Philosophy*. Vol. 41. 1990. PP. 195-222 – A. CLARK: Superpositional Connectionism: A Reply to Marinov. *Minds and Machines*. Vol. 3. 1993. PP. 271-81 – A. CLARK: Minimal Rationalism. *Mind*. Vol. 102. 1993. PP. 587-610 – A. CLARK / A. KARMILOFF-SMITH: The Cognizer's Innards: A Philosophical and Psychological Perspective on the Development of Thought. *Mind and Language*. Vol. 8. 1993. PP. 487-519 – A. CLARK / A. KARMILOFF-SMITH: What's Special about the Development of the Human Mind/Brain. *Mind and Language*. Vol. 8. 1993. PP. 569-81 – A. CLARK: Connectionist Minds. In: C. MacDONALD, Gr. MacDONALD: *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995. PP. 339-56 – A. CLARK / Chr. THORNTON: Trading Spaces: Computation, Representation and the Limits of Uninformed Learning. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 57-67 – A. CLARK / Chr. THORNTON: Author's Response: Relational Learning Reexamined. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 83-90

Einführend s. z.B. A. CLARK: *Mindware. An Introduction to the Philosophy of Cognitive Science*. Oxford Univ. Press. New York, Oxford. 2001. PP. 62-83 – A. CLARK / R. LUTZ: Introduction. In: A. CLARK / R. LUTZ (Eds.): *Connectionism in Context*. Springer-Verl. London u.a. 1992.

S. auch A. CLARK / R. LUTZ (Eds.): *Connectionism in Context*. Springer-Verlag. London u.a. 1992 – A. CLARK: *Being there: Putting Brain, Body and World together again*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 47-51, 53-69, 97-102, 149-53.

1645 S. A. CLARK: *Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1989.

1646 S. A. CLARK: *Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1993.

1647 S. z.B. A. CLARK: Systematicity, Structured Representations and Cognitive Architecture: A Reply to Fodor and Pylyshyn. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 198-218 – A. CLARK: The Presence of a Symbol. *Connection Science*. Vol. 4. No. 3./4. 1992. PP. 193-205 – A. CLARK / J. TORIBIO: Doing without Representing? *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 401-31.

1648 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.01.

1649 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213.

1650 Siehe die Ausführungen in Kap. 5.1.02.1.

1651 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.07.

1652 S. grundlegend z.B. A. CLARK: *Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1989. PP. 35-36, 59, 143-60, 161-75, 187-96: "Microfunctionalism (...) would describe at least the *internal* functional

Informationsverarbeitung dazu führen, daß – im Gegensatz zu einer konkatenativen kompositionalen Struktur eines symbolischen Kodes i.S. von J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁶⁵³ – eine komplexe Repräsentation eine funktionale kompositionale Struktur besitzt.

profile of the system (the internal state transitions) (...). It would delineate formal (probably mathematical) relations between processing units in a way that when those mathematical relations obtain, the system will be capable of vast, flexible structural variability and will have the attendant emergent properties." (P. 35)

S. einfürend z.B. A. CLARK / Chr. ELIASMITH: Philosophical Issues in Brain Theory and Connectionism. In: M. ARBIB (Ed.): Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. PP. 886-88, v.a. P. 886: "(...) a variety of connectionist techniques have been developed to allow for structure-sensitive processing, but such techniques have been described (...) as providing *functional*, as opposed to *concatenative*, compositional structure. A complex representation has concatenative structure if it embeds the individual constitutive elements unaltered within it. It has functional compositional structure if such components are usable or retrievable, but the complex expression does not itself embed unaltered tokens of these parts. Most connectionist schemes for dealing with compositional structure are functionally compositional (e.g., RAAM architectures, tensor product encodings, holographic reduced representations (HRRs)); although synchrony binding is concatenative."

S. auch A. CLARK: Microfunctionalism: Connectionism and the Scientific Explanation of Mental States. An Amended Version of Material (Ch. 1, 2, and 6) that first Appeared in: A. CLARK: Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1989. PP. 1-44, v.a. PP. 29-32.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.4.

¹⁶⁵³ Siehe die Ausführungen in Kap. 2.14, 5.1.01.12.

6.15.05 CONCEPTUAL SPACES NACH P. GÄRDENFORS¹⁶⁵⁴

6.15.05.0 Seit Anfang der neunziger Jahre des 20. Jhdts hat der schwedische Philosoph und Kognitionswissenschaftler Peter GÄRDENFORS¹⁶⁵⁵, vor allem mit seinem Buch: "CONCEPTUAL SPACES: THE GEOMETRY OF THOUGHT"¹⁶⁵⁶ aus dem Jahr 2000, ein theoretisches Modell für mentale Repräsentationen, das sich auf topologische oder geometrische Strukturen stützt, entworfen, sich dabei stützend auf P.M. CHURCHLAND's "State-Space Semantics (SSS)"¹⁶⁵⁷, J. FOSS' "Vector Function Theories"¹⁶⁵⁸ und A. PELLIONISZ' und R. LLINÁS' "Tensor Network Theory"¹⁶⁵⁹, wobei er die elementaren Konstruktionen als sog. „konzeptuelle Räume“ (engl. "conceptual spaces")¹⁶⁶⁰ bezeichnet, die aus einer Reihe von einfachen Qualitätsdimensio-

1654 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des gleichnamigen Kapitels 6.443 in meiner Magisterarbeit: H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

1655 Zur Person Peter GÄRDENFORS' siehe die Website <http://www.lu.se/peter.gardenfors/>.

1656 S. P. GÄRDENFORS: *Conceptual Spaces: The Geometry of Thought*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000.

1657 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.01.

1658 S.J. FOSS: *The Percept and Vector Function Theories of the Brain*. *Philosophy of Science*. Vol. 55. 1988. PP. 511-37.

1659 Siehe die Ausführungen in Kap. 6.15.01.0, Fn. 7.

1660 Grundlegend s. z.B. P. GÄRDENFORS: *A Geometric Model of Concept Formation*. In: S. OHSUGA et al. (Eds.): *Information Modelling and Knowledge Bases III*. IOS Press. Amsterdam. 1992. PP. 1-16 – P. GÄRDENFORS: *Konzeptuelle Räume*. *Kognitionswissenschaft*. Bd. 4. 1995. S. 185-89, v.a. S. 186-87 – P. GÄRDENFORS: *Mental Representations, Conceptual Spaces and Metaphors*. *Synthese*. Vol. 106. 1996. PP. 21-47 – P. GÄRDENFORS: *Conceptual Spaces as a Basis for Cognitive Semantics*. In: A. CLARK / J. EZQUERRO / J. LARRAZABEL (Eds.): *Philosophy and Cognitive Science: Categories, Consciousness, and Reasoning*. *Proceedings of the Second International Colloquium on Cognitive Science*. Kluwer. Dordrecht. 1996. PP. 159-80 – P. GÄRDENFORS: *Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations*. In: V. CANTONI et al. (Eds.): *Human and Machine Perception: Information Fusion*. Plenum Press. New York. 1997. PP. 255-70 – P. GÄRDENFORS: *Meanings as Conceptual Structures*. In: M. CARRIER / P. MACHAMER (Eds.): *Mindscales: Philosophy, Science, and the Mind*. Pittsburgh University Press. Pittsburgh. 1997. PP. 61-86 – P. GÄRDENFORS: *Conceptual Spaces: The Geometry of Thought*. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000. PP. 1-31, v.a. PP. 4-6 – P. GÄRDENFORS: *Concept Combination: A Geometrical Model*. In: L. CAVEDON / P. BLACKBURN / N. BRAISBY / A. SHIMOJIMA (Eds.): *Logic, Language and Computation*. Vol. 3. CSLI. Stanford/CA. 2000. PP. 129-46 – P. GÄRDENFORS: *Concept Learning: A Geometrical Model*. *Proceedings of the Aristotelian Society*. 2001. Vol. 101. PP. 163-83 – P. GÄRDENFORS / M.-A. WILLIAMS: *Reasoning about Categories in Conceptual Spaces*. *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence (IJCAI'95)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco/CA. 2001. PP. 385-92 – P. GÄRDENFORS: *Conceptual Spaces as a Basis for Knowledge Representation*. *Mind and Matter*. Vol. 2. 2004. PP. 9-27 – P. GÄRDENFORS: *Reasoning in Conceptual Spaces*. In: J. ADLER / L. RIPS: *Reasoning: Studies of Human Inference and its Foundations*. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 302-20 – P. GÄRDENFORS: *Semantics Based on Conceptual Spaces*. In: M. BANERJEE / A. SETH (Eds.): *Logic and its Applications*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 1-11 – M. WARGLIEN / P. GÄRDENFORS: *Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of Minds*. *Synthese*. DOI 10.1007/s11229-011-9963-z. 2011. PP. 1-29.

S. auch P. GÄRDENFORS: *The Dynamics of Thought*. Springer Verlag. Dordrecht. 2005.

nen (engl. "quality dimensions")¹⁶⁶¹ bestehen, die entweder einen abstrakten oder einen sensorischen Charakter besitzen können, und entweder angeboren oder erst zu erlernen sind, oder sogar erst durch die Wissenschaft eingeführt worden sind.¹⁶⁶²

6.15.05.1 Im Gegensatz zum Forschungsprogramm des sog. „Logischen Positivismus“ des Wiener Kreises¹⁶⁶³ geht nun P. GÄRDENFORS¹⁶⁶⁴ mit seiner Theorie der konzeptuellen Räume davon aus, daß man ein geometrisches bzw. vektorielles Repräsentationsformat einzuführen hat, um (semantische) Information i.S. von S.E. PALMER¹⁶⁶⁵ „intrinsisch“ (engl. "intrinsic") zu repräsentieren, d.h. anhand einer vektorbasierten EUKLIDischen (Distanz-)Metrik¹⁶⁶⁶ im Rahmen der sog. „VORONOI-Zerlegung“ (engl. "VORONOI tessellation")¹⁶⁶⁷ eines n -dimensionalen (System-)Zustandsraums, wonach ein semantisches Konzept als konvexe Region (engl. "convex region")¹⁶⁶⁸ in einem konzeptuellen (Vektor-)Raum modelliert wird, sodaß dies als Basis dient, um die Semantik einer natürlichen Sprache überzeugender zu modellieren¹⁶⁶⁹, wobei dies z.B. im Rahmen der Begriffsbildung in einem Be-

1661 S. z.B. P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces as a Basis for Knowledge Representation. Mind and Matter. Vol. 2. 2004. PP. 10-18.

1662 S. z.B. M. WARGLIEN / P. GÄRDENFORS: Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of Minds. Synthese. Published online 09 June 2011. From: DOI 10.1007/s11229-011-9963-z. P. 6: "(...) conceptual spaces are constructed out of primitive quality dimensions (often grounded in sensory experience) and that similarity provides the basic metric structure to such spaces. The dimensions represent various qualities of objects (e.g., color, shape, weight, size, force, position) in different domains."

1663 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.14.

1664 S. z.B. P. GÄRDENFORS: Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations. In: V. CANTONI et al. (Eds.): Human and Machine Perception: Information Fusion. Plenum Press. New York. 1997. PP. 7-11 – P. GÄRDENFORS: Konzeptuelle Räume. Kognitionswissenschaft. Bd. 4. 1995. S. 187-89.

1665 S. z.B. P. GÄRDENFORS: Konzeptuelle Räume. Kognitionswissenschaft. Bd. 4. 1995. S. 187 mit Hinweis auf S.E. PALMER: Fundamental Aspects of Cognitive Representation. In: E. ROSCH / B.B. LLOYD (Eds.): Cognition and Categorization. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 259-303.

1666 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.210.

1667 Zur sog. „VORONOI-Zerlegung“ (engl. "VORONOI tessellation"), benannt nach dem russischen Mathematiker Georgy VORONOI, s. z.B. P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000. PP. 87-92 – P. GÄRDENFORS / M.-A. WILLIAMS: Reasoning about Categories in Conceptual Spaces. Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence (IJCAI'95). Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco/CA. 2001. PP. 387-89 – P. GÄRDENFORS: A Geometric Model of Concept Formation. In: S. OHSUGA et al. (Eds.): Information Modelling and Knowledge Bases III. IOS Press. Amsterdam. 1992. PP. 1-16 – P. GÄRDENFORS: Concept Combination: A Geometrical Model. In: L. CAVEDON / P. BLACKBURN / N. BRAISBY / A. SHIMOJIMA (Eds.): Logic, Language and Computation. Vol. 3. CSLI. Stanford/ CA. 2000. PP. 132-35, 135-38, 142-43.

S. auch z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 466-68 – R. ROJAS: Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. Springer-Verl. Berlin u.a. 1993. S. 367-69 – R. BRAUSE: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik. B.G. Teubner. Stuttgart. 1995. S. 140-42.

1668 S. z.B. P. GÄRDENFORS / M.-A. WILLIAMS: Reasoning about Categories in Conceptual Spaces. Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence (IJCAI'95). Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco/CA. 2001. PP. 385-86.

1669 S. z.B. M. WARGLIEN / P. GÄRDENFORS: Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of

griffsraum sehr gut in Einklang steht mit der sog. „Prototypentheorie“ (engl. „prototype theory“)¹⁶⁷⁰ i.S. der U.S.-amerikanischen Psychologin Eleanor ROSCH¹⁶⁷¹.

6.15.05.2 Desweiteren hat sich P. GÄRDENFORS eingehend auch mit der (Variablen-)Bindungsproblematik der Tensorprodukt-Repräsentation (engl. „Tensor Product Representation (TPR)“) P. SMOLENKY's und der damit einhergehenden Kompositionalitätsproblematik beschäftigt¹⁶⁷², sowie mit der

Minds. Synthese. Published online 09 June 2011. From: DOI 10.1007/s11229-011-9963-z. PP. 6-9 – P. GÄRDENFORS: Semantics Based on Conceptual Spaces. In: M. BANERJEE / A. SETH (Eds.): Logic and its Applications. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 1-10 – P. GÄRDENFORS: Reasoning in Conceptual Spaces. In: J. ADLER / L. RIPS: Reasoning: Studies of Human Inference and its Foundations. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 309-11 – P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces as a Basis for Knowledge Representation. Mind and Matter. Vol. 2. 2004. PP. 18-20 – P. GÄRDENFORS / M.-A. WILLIAMS: Reasoning about Categories in Conceptual Spaces. Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence (IJCAI'95). Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco/CA. 2001. PP. 385-92 – P. GÄRDENFORS: Concept Learning: A Geometrical Model. Proceedings of the Aristotelian Society. 2001. Vol. 101. PP. 168-72, 175-81 – P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000. PP. 59-100, 101-150, 151-202 – P. GÄRDENFORS: Meanings as Conceptual Structures. In: M. CARRIER / P. MACHAMER (Eds.): Mindscapes: Philosophy, Science, and the Mind. Pittsburgh University Press. Pittsburgh. 1997. PP. 61-86 – P. GÄRDENFORS: Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations. In: V. CANTONI et al. (Eds.): Human and Machine Perception: Information Fusion. Plenum Press. New York. 1997. PP. 255-70 – P. GÄRDENFORS: A Geometric Model of Concept Formation. In: S. OHSUGA et al. (Eds.): Information Modelling and Knowledge Bases III. IOS Press. Amsterdam. 1992. PP. 1-16.

¹⁶⁷⁰ S. hierzu die Ausführungen in Kap. 6.434.

¹⁶⁷¹ S. z.B. M. WARGLIEN / P. GÄRDENFORS: Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of Minds. Synthese. DOI 10.1007/s11229-011-9963-z. P. 7: “Assume that some quality dimensions of a conceptual space are given: for example, the dimensions of color space; and that the intention is to decompose it into a number of categories: in this case, color concepts. If one starts from a set of concept prototypes p_1, \dots, p_n – say, the focal colors – then these prototypes should be the central points in the concepts they represent. The information about prototypes can then be used to generate convex regions by stipulating that any point p within the space belongs to the same concept as the closest prototype p_i . This rule will generate a certain decomposition of the space: a so-called Voronoi tessellation. (...)”

The basic idea is that the most typical meaning of a word or linguistic expression is the prototype at the centre of the convex region assigned to the word.”

S. auch P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces as a Basis for Knowledge Representation. Mind and Matter. Vol. 2. 2004. PP. 20-24 – P. GÄRDENFORS: Concept Learning: A Geometrical Model. Proceedings of the Aristotelian Society. Vol. 101. 2001. PP. 172-75 – P. GÄRDENFORS: Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000. PP. 84-87 – P. GÄRDENFORS: Konzeptuelle Räume. Kognitionswissenschaft. Bd. 4. 1995. S. 188-89 mit Hinweis auf E. ROSCH: Cognitive Representations of Semantic Categories. Journal of Experimental Psychology: General. Vol. 104. 1975. PP. 192-233 und E. ROSCH: Prototype Classification and Logical Classification: The Two Systems. In: E. SCHOLNIK (Ed.): New Trends in Cognitive Representation: Challenges to Piaget's Theory. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 73-86.

S. hierzu die Ausführungen in Kap. 6.434, 6.5.

¹⁶⁷² S. z.B. M. WARGLIEN / P. GÄRDENFORS: Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of Minds. Synthese. Published online 09 June 2011. From: DOI 10.1007/s11229-011-9963-z. PP. 18-25 – P. GÄRDENFORS: Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations. In: V. CANTONI et al. (Eds.): Human and Machine Perception: Information Fusion. Plenum Press. New York. 1997. PP. 266-69 – P. GÄRDENFORS: Mental Representations, Conceptual Spaces and Metaphors. Synthese. Vol. 106. 1996. PP. 31, 32 – P. GÄRDENFORS: How Logic Emerges from the Dynamics of

Erzeugung einer nichtmonotonen Inferenzrelation (engl. "nonmonotonic inference relation"), basierend auf einer sog. „Resonanzfunktion“ (engl. "resonance function") i.S. M.A. COHEN's und St. GROSSBERG's¹⁶⁷³, anhand eines neuronalen Netzwerks, angelehnt an das "Interactive Activation network" i.S. D.E. RUMELHART's und J.L. McCLELLAND's.¹⁶⁷⁴

Information. In: J. van EIJCK / A. VISSER (Eds.): Logic and Information Flow. MIT Press. Cambridge/MA. 1994. PP. 67-75.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.437.3.

1673 S. M.A. COHEN / St. GROSSBERG: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 13. 1983. PP. 815-26.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0.

1674 S. z.B. J.L. McCLELLAND: The Programmable Blackboard Model of Reading. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. (1986) 1988. PP. 122-69, v.a. PP. 122-25.

6.15.06 NEURO(-PARTITIONS-)LOGIK NACH O. BREIDBACH¹⁶⁷⁵

6.15.06.0 Seit den neunziger Jahren des 20. Jhdt.'s hat sich der (Neuro-)Biologe und Philosoph Olaf BREIDBACH¹⁶⁷⁶ mit dem Konnektionismus beschäftigt¹⁶⁷⁷, z.B., zusammen mit dem Physiker Klaus HOLTHAUSEN¹⁶⁷⁸, mit der aus der Neuroinformatik stammenden sog. „Selbstorganisierenden (Merkmals-)Karte“ (engl. “Self-Organizing (Feature) Map (SOM)”) T. KOHONEN's¹⁶⁷⁹, und hat darauf aufbauend eine sog. „Neurosemantik“ entworfen, basierend auf seinem Programm der sog. „Neuro(-partitions-)logik“¹⁶⁸⁰ in Form eines Attraktorsimulationsmodells¹⁶⁸¹ mit Transienten- und Trajektoriencharakteri-

-
- 1675 Dieses Kapitel ist eine zum großen Teil übernommene und zum Teil überarbeitete Fassung des gleichnamigen Kapitels 6.441 in meiner Magisterarbeit: H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.
- 1676 Zur Person Olaf BREIDBACH's siehe die Website http://www.ehh.uni-jena.de/Mitarbeiter/Prof_+Dr_+Dr_+Olaf+Breibach.html.
- 1677 S. z.B. O. BREIDBACH: Mustergestaltung und deren Ordnung in Neuronalen Netzen. In: W. HAHN / P. WEIBEL (Hrsg.): Evolutionäre Symmetrietheorie. Selbstorganisation und dynamische Systeme. S. Hirzel. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart. Stuttgart. 1996. S. 41-51
- 1678 Zur Person Klaus HOLTHAUSEN's siehe die Website http://www.xing.com/profile/-Klaus_Holthausen2.
- 1679 S. z.B. Kl. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: Self-Organized Feature Maps and Information Theory. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 8. 1997. PP. 215-27 – J. JOST / Kl. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: On the Mathematical Foundations of a Theory of Neural Representation. Theory in Biosciences. Vol. 116. 1997. PP. 125-39 – Kl. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: Analytical Description of the Evolution of Neural Networks: Learning Rules and Complexity. Biological Cybernetics. Vol. 81. 1999. PP. 169-75 – Kl. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: Information Theory and Topology: New Learning Mechanisms. In: N. ELSNER / H.-U. SCHNITZLER (Eds.): Brain and Evolution. Proceedings of the 24th Göttingen Neurobiology Conference. G. Thieme Verlag. 1996. P. 813.
S. auch Kl. HOLTHAUSEN: Neuronale Netzwerke und Informationstheorie. Dissertation. Münster. 1995. S. 103-23.
Zur sog. „Selbstorganisierenden (Merkmals-)Karte“ (engl. “Self-Organizing (Feature) Map (SOM)”) T. KOHONEN's siehe die Ausführungen in Kpt. 4.4.01.
- 1680 Grundlegend s. z.B. O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 9-38, v.a. S. 26-34 – O. BREIDBACH / Kl. HOLTHAUSEN / J. JOST: Interne Repräsentationen – Über die „Welt“ generierungseigenschaften des Nervengewebes. Prolegomena zu einer Neurosemantik. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): Repräsentationismus – was sonst? Braunschweig. 1996. S. 177-95 – O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 93-110, v.a. S. 103-108 – O. BREIDBACH: Internal Representations – A Prelude for Neurosemantics. The Journal of Mind and Behavior. Vol. 20. 1999. PP. 403-20, v.a. PP. 410-17 – O. BREIDBACH: Neurologik? In: A. NEWEN / K. VOGLEY (Hrsg.): Selbst und Gehirn. MENTIS-Verlag. Frankfurt/M. 2000. S. 353-63 – O. BREIDBACH: Neurosemantics, Neurons and System Theory. Theory in Biosciences. Vol. 126. 2007. PP. 23-33, v.a. PP. 29-32.
- 1681 Eingehend s. z.B. O. BREIDBACH: Expeditionen ins Innere des Kopfes – Von Nervenzellen, Geist und Seele. TRIAS-Verlag. Stuttgart, New York. 1993.
S. auch Kl. HOLTHAUSEN: Neuronale Netzwerke und Informationstheorie. Dissertation. Münster. 1995. S. 77-102.
Einführend s. z.B. O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/M. 1996. S. 9-29, v.a. S. 21-29 – O. BREIDBACH / Kl. HOLTHAUSEN: Interne Repräsen-

stik, Bezug nehmend auf J. FREEMAN's sog. "K0-KV (KATCHALSKY) Set Attractor Network Models".¹⁶⁸²

6.15.06.1 Anhand dieser Neurologik versucht O. BREIDBACH das Verhältnis von Sprache und Weltwahrnehmung und Welterfahrung neu zu bestimmen, indem er die Parallelverarbeitungsfunktionen des menschlichen Gehirns mit dem „Vokabular der Physik“ analysiert, wobei er besonders hervorhebt, daß sich die System(-konfigurations-)struktur eines physikalischen Systems „relational aus dem Beziehungsgefüge der Binnenzustände definiert“¹⁶⁸³, woraus folgt, daß ein (Informations-)Element eines Systems „in seiner Funktion aus seinen Relationen mit anderen Elementen des Systems

tation – Zur Analyse der Dynamik parallel verarbeitender Systeme. Jahrbuch für Geschichte und Theorie der Biologie. Bd. 3. 1996. S. 61-74, v.a. S. 67-71 – O. BREIDBACH / KI. HOLTHAUSEN / J. JOST: Interne Repräsentationen – Über die „Welt“generierungseigenschaften des Nervengewebes. Prolegomena zu einer Neurosemantik. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): Repräsentationismus - was sonst? Eine kritische Auseinandersetzung mit dem repräsentationalistischen Forschungsprogramm in den Neurowissenschaften. Vieweg, Braunschweig. 1996. S. 177-95 – O. BREIDBACH: Denken in Neuronalen Netzen? In: Kl.-P. DENKER (Hrsg.): Labile Ordnungen – Netze denken. Verl. Hans-Bredow-Institut für Rundfunk und Fernsehen. Hamburg. 1997. S. 40-52, v.a. S. 47-52 – O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 101-103.

Nach O. BREIDBACH: Neurologik? In: A. NEWEN / K. VOGLEY (Hrsg.): Selbst und Gehirn. MENTIS-Verlag. Frankfurt/M. 2000. S. 359-60 besteht der Ausgangspunkt der „vernetzten Struktur der Kopplungsbezüge“ eines parallel verarbeitenden Systems i.S. von V. BRAITENBERG / A. SCHÜZ: Anatomy of the Cortex. Statistics and Geometry. Springer Verl. Berlin, New York. 1991 in der elementaren Charakteristik der Neuronenaktivitätsfunktionen des Systems: „Ein Attraktor läßt sich demnach als eine Zuordnung von [Neuronenaktivitätssub-]Elementen darstellen, die sich als ein Cluster (...) der Elemente (...) über eine Periode (...) definieren läßt.“

(...)

„Die Identität eines Clusters ist nicht durch die absoluten, sondern die relativen Maßverhältnisse in der Kopplung der verschiedenen Elemente des Systems definiert. Die Identität eines Clusters bestimmt sich aus den relativen Distanzen der Elemente innerhalb jedes Clusters zueinander und zu den anderen Clusterelementen.“

1682 S. O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/Main. 1996. S. 20-21.

1683 S. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 96-97.

S. auch z.B. O. BREIDBACH / KI. HOLTHAUSEN: Interne Repräsentation – Zur Analyse der Dynamik parallel verarbeitender Systeme. Jahrbuch für Geschichte und Theorie der Biologie. Bd. 3. 1996. S. 61-74, v.a. S. 69-70 – O. BREIDBACH: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verl. Frankfurt/Main. 1996. S. 27-29: „Das System assoziiert seine Zustände und kreiert damit einen Relationsraum, der ein kontinuierlich diversifiziertes, aber in jedem Punkt der Entwicklung in sich geschlossenes Relationsgefüge konstituiert.“

(...)

„Das System definiert in der Zuordnung von Außenzuständen an ein Attraktorgefüge einen Relationsraum. Darüber 'weiß' das System selbst allerdings nichts. Es konturiert dann aber auch Klassen von Attraktorzuständen, in denen ähnliche und nicht ähnliche Binnenzustände unterschieden werden, wobei mit fortlaufender Differenzierung das Raster einer entsprechenden Einbindung immer enger wird. Damit konstituiert sich das System sein ihm auf Grund seiner Binnencharakteristika eigenes Muster von Zuordnungen. Es konstituiert eine ihm eigene Semantik.“

definiert ist“¹⁶⁸⁴, weshalb es sich zeigen läßt, daß dadurch ein gewisser Typ von Semantik entwickelt wird, indem Information als eine Funktion der vektoriellen Topologie im Rahmen der Systemdynamik verstanden wird.¹⁶⁸⁵ In diesem Vorgehen gewinnt man demnach einen Ansatz zu einer neuen, umfassenden Informationstheorie im Sinne einer Quantifikation der dynamischen Relationsstruktur des Systems, wobei die selbstorganisierende und selbststrukturierende Interpretation der (Informations-)Zustände des Systems überwiegend nach Maßgabe seiner systeminternen Parameter gemäß der Systemcharakteristik vorgenommen wird¹⁶⁸⁶, weshalb hervorgehoben wird, daß man „nicht mehr an einen Formalismus gebunden ist, der allein mit disjunkten Partitionen arbeitet“¹⁶⁸⁷, und „das Konzept der internen Repräsentation (...) nicht über eine Transformationsfunktion beschrieben wird (...)“¹⁶⁸⁸

Was die höheren kognitiven Funktionen betrifft, kann man nach O. BREIDBACH¹⁶⁸⁹, sich auf W.V.O. QUINE¹⁶⁹⁰ berufend, nun Sprache und Sprachverhalten als ein „neuronales Funktionsprogramm“ ansehen, in dessen Analyse man einen Ansatz erhält, aus der internen Systemstrukturcharakteristik „ein Verständnis dessen zu entwickeln, was die ‚Bedeutung‘ eines sprachlichen (...) Ausdrucks ist“, und damit i.S. der Assoziationspsychologie und des Konnektionismus die grundlegenden Ordnungsmuster der Weltwahrnehmung aufzudecken. Eine Sprache wäre somit, neben den kulturellen Normen, die einen hohen Grad an Assoziationsreferenzen garantieren, letztlich „aber nur dadurch kommunikabel, daß sie in ihrer Struktur auf physiologischen Grundgesetzmäßigkeiten im Bau neuronaler Strukturen basiert.“

6.15.06.2 Desweiteren hat sich O. BREIDBACH¹⁶⁹¹ auch mit der Bindungspro-

1684 S. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 105-106.

1685 S. z.B. O. BREIDBACH: Neurologik? In: A. NEWEN / K. VOGELY (Hrsg.): Selbst und Gehirn. MENTIS-Verlag. Frankfurt/M. 2000. S. 357 spricht vom „„Aufspannen‘ einer Erregungslandschaft oder von einem Eigenschaftsraum“.

1686 In Bezug auf den sog. KOHONEN-Algorithmus s. z.B. KI. HOLTHAUSEN: Neuronale Netzwerke und Informationstheorie. Dissertation. Münster. 1995. S. 109-22 – KI. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: Self-Organized Feature Maps and Information Theory. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 8. 1997. PP. 215-27.

1687 S. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 102, 103, 104.

1688 S. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 102.

1689 S. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 96, 97-98, 107-108 mit Hinweis auf W.V.O. QUINE: Propositionale Gegenstände. In: Ontologische Relativität und andere Schriften. Reclam. Stuttgart. 1975. S. 190-218.

1690 M.E. kann man in der Philosophie und Wissenschaftstheorie W.V.O. QUINE's an mehreren Stellen ein „Netzwerk-Denken“ in diesem Sinn feststellen, z.B. das „Gewölbe“- Beispiel im Rahmen seiner sog. „Unterbestimmtheits-(engl. ‚underdetermination‘)-These“ von Theorien in seinem Hauptwerk „WORD AND OBJECT“ aus dem Jahr 1960.

1691 S. z.B. KI. HOLTHAUSEN / O. BREIDBACH: Analytical Description of the Evolution of Neural Networks: Learning Rules and Complexity. Biological Cybernetics. Vol. 81. 1999. PP. 169-75, v.a. PP.

blematik in den kognitiven Neurowissenschaften beschäftigt und dessen informationstheoretischer Analyse i.S. des sog. „funktionalen Clusterings“ (engl. “functional clustering”) nach G.M. EDELMAN und G. TONONI¹⁶⁹².

170, 171-72, 173, 175.

Zum sog. „funktionalen Clustering“ (engl. “functional clustering”) nach G.M. EDELMAN und G. TONONI siehe die Ausführungen in Kap. 4.3.01.1.

S. auch O. BREIDBACH: Neurosemantics, Neurons and System Theory. Theory in Biosciences. Vol. 126. 2007. P. 26.

¹⁶⁹² Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.01.1.

6.15.07 DYNAMICAL HYPOTHESIS NACH T. VAN GELDER

6.15.07.0 Seit dem Ende der achtziger Jahre bis zum Ende der neunziger Jahre des 20. Jhdts. hat sich der australische Philosoph und Kognitionswissenschaftler Tim(-othy) van GELDER¹⁶⁹³ neben der Beschäftigung mit seiner sog. „Dynamischen Hypothese“ (engl. „Dynamical Hypothesis (DH)“)¹⁶⁹⁴, auch mit Themen aus dem Konnektionismus beschäftigt, vor allem mit der Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik und mit dem Problem der mentalen Repräsentation im Konnektionismus.¹⁶⁹⁵

6.15.07.1 Eines seiner Hauptarbeitsgebiete betraf die Analyse des Begriffs einer sog. „verteilten Repräsentation“ (engl. „distributed representation“)¹⁶⁹⁶ im Konnektionismus.

6.15.07.2 Daneben widmete sich T. van GELDER, zusammen mit dem schwedischen Informatiker Lars F. NIKLASSON, dem Problem der Systematizität von konnektionistischen Architekturen¹⁶⁹⁷, und dem Problem der (se-

1693 Zur Person Tim(-othy) van GELDER's siehe Kap. 1.24.04, Fn. 141.

1694 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.03.

1695 Grundlegend s. z.B. T. van GELDER: Distributed Representation. PhD Thesis. University of Pittsburgh. 1989.

Eingehend s. z.B. T. van GELDER: Compositionality and the Explanation of Cognitive Processes. Compositionality and the Explanation of Cognitive Processes. In: G. OLSON / E. SMITH (Eds.): Proceedings of the 11th Annual Conference of the Cognitive Science Society, 16-19 August 1989, Ann Arbor, Michigan. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989. PP. 34-41 – T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. No. 3. 1990. PP. 355-84 – T. van GELDER: Why Distributed Representation is Inherently Non-Symbolic. In: G. DORFFNER (Hrsg.): Konnektionismus in Artificial Intelligence und Kognitionsforschung. 1990. PP. 58-66 – T. van GELDER: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 33-59 – T. van GELDER: Classical Questions, Radical Answers: Connectionism and the Structure of Mental Representations. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 355-81 – T. van GELDER: Defining "Distributed Representation". Connection Science. Special Issue on Philosophical Issues in Connectionist Modeling. Vol. 4. No. 3-4. 1992. PP. 175-91 – T. van GELDER: Making Conceptual Space. In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 179-94 – T. van GELDER: Compositionality and Dynamics in Neural Networks Representations. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 49-67 – L.F. NIKLASSON / T. van GELDER: On Being Systematically Connectionist. Mind and Language. Vol. 9. No.3. 1994. PP. 288-302 – T. van GELDER / R. PORT: Beyond Symbolic: Toward a Kama-Sutra of Compositionality. In: V. HONAVAR / L. UHR (Eds.): Artificial Intelligence and Neural Networks: Steps toward Principled Integration. Academic Press. San Diego/CA, London. 1994. PP. 107-25 – L. NIKLASSON / T. van GELDER: Can Connectionist Models Exhibit Non-Classical Structure Sensitivity? In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 664-69 – T. van GELDER / L. NIKLASSON: Classicism and Cognitive Architecture. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 905-909 – T. van GELDER: Modeling, Connectionist and Otherwise. In: L.F. NIKLASSON / M. BODEN: Current Trends in Connectionism: Proceedings of the 1995 Swedish Conference on Connectionism. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1995. PP. 217-35.

1696 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.

1697 S. z.B. L.F. NIKLASSON / T. van GELDER: On Being Systematically Connectionist. Mind and Language. Vol. 9. No.3. 1994. PP. 288-302 – L. NIKLASSON / T. van GELDER: Can Connectionist

mantischen) Kompositionalität¹⁶⁹⁸, vor allem in der Auseinandersetzung mit der Tensorprodukt-Repräsentation (engl. "Tensor Product Representation") P. SMOLENSKY's, wobei er zwischen einer sog. „konkatenativen“ und einer „funktionalen Kompositionalität“ (engl. "concatenative" und "functional compositionality")¹⁶⁹⁹ unterscheidet.

Models Exhibit Non-Classical Structure Sensitivity? In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 664-69.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 5.5240. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 66.

1698 S. z.B. T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. No. 3. 1990. PP. 355-84 – T. van GELDER / R. PORT: Beyond Symbolic: Toward a Kama-Sutra of Compositionality. In: V. HONAVAR / L. UHR (Eds.): Artificial Intelligence and Neural Networks: Steps toward Principled Integration. Academic Press. San Diego/CA, London. 1994. PP. 107-25 – T. van GELDER: Compositionality and Dynamics in Neural Networks Representations. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 49-67 – T. van GELDER: Compositionality and the Explanation of Cognitive Processes. Compositionality and the Explanation of Cognitive Processes. In: G. OLSON / E. SMITH (Eds.): Proceedings of the 11th Annual Conference of the Cognitive Science Society. 16-19 August 1989, Ann Arbor, Michigan. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989. PP. 34-41.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 5.5233. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 63.

1699 S. T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. No. 3. 1990. PP. 364-75.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

6.15.08 THEORIE DER KOMPLEXEN SYSTEME MIT NICHTLINEARER DYNAMIK NACH KI. MAINZER

6.15.08.0 Seit den neunziger Jahren des 20. Jhdts hat sich der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Klaus MAINZER¹⁷⁰⁰, neben der (Haupt-)Beschäftigung mit der Theorie der nichtlinearen komplexen Systeme¹⁷⁰¹, auch mit Themen aus der Neuroinformatik und Neurophilosophie, der Robotik, der Künstlichen Intelligenz (KI) und des Konnektionismus beschäftigt.¹⁷⁰²

6.15.08.1 Eine seiner Kernthesen besteht nun darin, daß die sog. „Philosophie des Geistes“ (engl. „philosophy of mind“)¹⁷⁰³ i.S. der modernen Neurophilosophie den Kern und die Einheit eines fachübergreifenden Forschungsprogramms über den „Geist“ bietet¹⁷⁰⁴, wobei sie dabei „wissenschaftstheoretisch von den Forschungsstandards der KI, [den] Neuro- und Kognitionswissenschaften abhängt“¹⁷⁰⁵, insbesondere z.B. von dem Paradigma der

1700 Zur Person Klaus Mainzer's siehe Kap. 1.24.04, Fn. 150.

1701 Siehe hierzu die Ausführungen in Kpt. 1.24.04.

1702 Grundlegend s. z.B. KI. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*. (5. Aufl.) Springer. Berlin u.a. 1994 (2007). PP. 117-63, 165-236.

Eingehend s. z.B. KI. MAINZER: *Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie*. In: G. KAISER (Hrsg.): *Kultur und Technik im 21. Jahrhundert*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1993. S. 118-31 – KI. MAINZER: *Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie*. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 131-51 – KI. MAINZER: *Grundlagen, Erfolge und Grenzen mathematischer Modelle in der Gehirnforschung*. In: *Ethik und Sozialwissenschaften*. Bd. 6. 1995. S. 103-105 – KI. MAINZER: *Cellular Neural Networks (CNN) and the Evolution of Complex Information Systems in Nature and Technology*. In: R. TETZLAFF (Ed.): *Cellular Neural Networks and their Applications. Proceedings of 7th IEEE International Workshop*. World Scientific. New Jersey. 2002. PP. 483-97 – KI. MAINZER: *Geist und Gehirn als komplexe Einheit*. In: Daiseion-ji e.V. / Wilhelm Gottfried Leibniz Gemeinschaft e.V. (Hrsg.): *2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für integrative Wissenschaft*. Verlag J.H. Röll. Bonn. 2006. S. 11-33 – KI. MAINZER: *The Emergence of Self-Conscious Systems. From Symbolic AI to Embodied Robotics*. In: L. LEWIS / T. METZLER (Eds.): *Human Implications of Human-Robot Interaction*. Templeton Foundation Press. Philadelphia. 2007 – KI. MAINZER: *Computer, künstliche Intelligenz und Theory of Mind: Modelle des Menschlichen?* In: H. FÖRSTL (Hrsg.): *Theory of Mind. Neurobiologie und Psychologie des sozialen Verhaltens*. Springer Medizin Verlag. Heidelberg. 2007. S. 79-89 – KI. MAINZER: *Organic Computing and Complex Dynamical Systems. Conceptual Foundations and Interdisciplinary Perspectives*. In: R.P. WÜRTZ (Ed.): *Organic Computing*. Springer Verl. Berlin. 2008. PP. 105-22.

Einführend s. z.B. KI. MAINZER: *Gehirn, Computer, Komplexität*. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 67-119, 143-61, 163-84 – KI. MAINZER: *KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 2003 – KI. MAINZER: *Computerphilosophie zur Einführung*. Junius Verl. Hamburg. 2003. S. 60-93 – KI. MAINZER: *Komplexität*. Kap. 6. UTB. Paderborn. 2008. S. 65-76 – KI. MAINZER: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Mentis Verlag. Paderborn. 2010. S. 45-88, 89-144, 145-79.

1703 S. Kap. 6.15.01.0, Fn. 1592.

1704 S. KI. MAINZER: *Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie*. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 131-32.

1705 S. KI. MAINZER: *Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie*. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 137.

Selbstorganisation¹⁷⁰⁶, deren methodische Beschränkung i.S. der sog. „(konservativen) Selbstorganisation“ mit der Betrachtungsweise der Thermodynamik fern des thermischen Gleichgewichts als einer sog. „dissipativen Selbstorganisation“ i.S. I. PRIGOGINE's und H. HAKEN's überwunden worden ist.¹⁷⁰⁷ Danach entstehen anhand von dissipativen Phasenübergängen nach Transformationsfunktionen Klassen von emergenten Strukturen, die als sog. „Attraktoren“ (engl. “attractors”)¹⁷⁰⁸ im Rahmen der Theorie der nichtlinearen komplexen Dynamischen Systeme beschrieben werden.¹⁷⁰⁹ Wird nun das lebende Gehirn i.S. der Thermodynamik als „ein ‚heißes‘ System fern des thermischen Gleichgewichts“¹⁷¹⁰, m.a.W. als ein solches komplexes System aufgefaßt, kann nach Kl. MAINZER¹⁷¹¹ der Erkenntnisvorgang mit H. von HELMHOLTZ eben keine isomorphe Abbildung der Gegebenheiten der Außenwelt sein, sondern es handelt sich um einen dynamischen Lernvorgang, der i.S. der sog. „Selbstorganisierenden (Merkmals-)Karte“ (engl. “Self-Organizing (Feature) Map (SOM)”) ¹⁷¹² T. KOHONEN's als ein Selbstorganisationsprozeß eines neuronalen Netzwerks verstanden wird, indem schrittweise sog. „topographische Karten“ (engl. “topographical maps”) der Außenwelt aufgebaut werden, in denen die wichtigsten Ähnlichkeitsrelationen i.S. einer vektoriellen Distanzmetrik zwischen den Eingabesignalen in (Vektorraum-)Lagerrelationen in Form von Referenzvektoren der jeweils entsprechenden Neuronen der KOHONEN-Schicht überführt werden.¹⁷¹³

1706 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.23.

1707 S. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 140-41 – Kl. MAINZER: *Synergetics and Complexity. Emerging New Science and Civilization at the Turn of the Century*. In: E.R. NAKAMURA et al. (Ed.): *Complexity and Diversity*. Springer-Verlag. Tokyo. 1997. PP. 10-29, v.a. PP. 12-15.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.230, 1.25.01 und 1.25.02.

1708 S. z.B. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 141.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.222 Fn. 21, 23, 24.

1709 S. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 141-42.

1710 S. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 140.

1711 S. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 142-43.

S. auch Kl. MAINZER: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Man-kind*. (5. Aufl.) Springer. Berlin u.a. 1994 (2007). PP. 134-36, 144 – Kl. MAINZER: *Gehirn, Computer, Komplexität*. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 159-61, 163-66.

1712 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.

1713 S. Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuoworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 143: „Die sich selbst organisierenden neuronalen Karten erzeugen Muster mit unterschiedlichen Typen von *Attraktoren*, wie sie aus der Theorie komplexer dynamischer Systeme bekannt sind. In der Forschung wird es darauf ankommen, diese Attraktoren als neuronale Repräsentationen von Wahrnehmungen, Emotionen und Gedanken zu identifizieren.“

Mentale bzw. kognitive Strukturen und Prozesse entsprechen somit Vektor-, Tensor- und Matrizen-Transformationen, die „Prototypmuster“¹⁷¹⁴ erzeugen im Rahmen der Theorie der komplexen Dynamischen Systeme, die die natürliche Evolution durch physikalische, chemische und biologische Selbstorganisation in Form von Phasenübergängen beschreibt, sodaß sich – analog zu dieser Muster- und Gestaltentstehung – Mustererkennung, Lernen und im allgemeinen Kognition als informationelle Selbstorganisation von neuronalen Netzen verstehen läßt.¹⁷¹⁵

1714 S. Kl. MAINZER: Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie. In: G. KAISER (Hrsg.): Kultur und Technik im 21. Jahrhundert. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1993. S. 126.

S. auch Kl. MAINZER: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind. (5. Aufl.) Springer. Berlin u.a. 1994 (2007). PP. 144-45 mit Hinweis auf das sog. "Prototype-Activation Model of Explanation" P.M. CHURCHLAND's.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.01.1.

1715 S. Kl. MAINZER: Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie. In: G. KAISER (Hrsg.): Kultur und Technik im 21. Jahrhundert. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1993. S. 121-27.

S. auch Kl. MAINZER: The Emergence of Self-Conscious Systems. From Symbolic AI to Embodied Robotics. In: L. LEWIS / T. METZLER (Eds.): Human Implications of Human-Robot Interaction. Templeton Foundation Press. Philadelphia. 2007. PP. 2-3 – Kl. MAINZER: Gehirn, Computer, Komplexität. Springer Verl. Berlin, Heidelberg, New York. 1997. S. 180-82.

6.2 GENERELLE VEKTORIELLE FORM EINES NEUROKOGNITIVEN (REPRÄSENTATIONS-)KONZEPTS IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS

6.20 Das grundlegende Thema der vorliegenden Arbeit wiederaufgreifend, das darin besteht, vor dem Hintergrund der analysierten Modelle im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus integrative (Synchronisations-)Mechanismen zu diskutieren, die das (allgemeine) Bindungsproblem zu lösen vorgeben, d.h. das Problem, wie in einem neurokognitiven System eine (Ver-)Bindung von informationellen (System-)Elementen zu kohärenten internen (neuro-)mentalenen bzw. (neuro-)kognitiven kompositionalen Konzepten i.w.S. dynamisch repräsentiert wird, m.a.W., wie eine (konkret) sensorische bzw. eine (abstrakt) syntaktisch-semantische (System-)Konstituente i.S. eines Konzepts i.w.S. (engl. "concept")¹⁷¹⁶ bzw. eines mentalen In- oder Gehalts (engl. "mental content") zu einer kohärenten (System-)Konstituentenstruktur in dynamischer Weise integriert wird. Daher wird erst einmal zu untersuchen sein, wie man sich – vor dem Hintergrund der analysierten Modelle im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus – ein generelles Modell der dynamischen, vektorbasierten Struktur eines (neuro-)mentalenen sensorischen Konzepts i.w.S., d.h. eines sog. „Perzepts“ (engl. "percept")¹⁷¹⁷ und eines syntaktisch-semantischen Konzepts i.e.S. (engl. "con-

1716 Unter dem Begriff des ((neuro-)mentalenen) Konzepts (engl. "((neuro-)mental) concept") im weiteren Sinn i.S. einer internen mentalenen Repräsentation eines geistigen bzw. Bewußtseinsinhalts versteht man in der Kognitionswissenschaft, der kognitiven Psychologie, der Linguistik und der (Neuro-)Philosophie, zum einen, eine Repräsentation eines sinnlichen, nicht-begrifflichen Wahrnehmungsinhalts, ein sog. „perzeptuelles Konzept“ (engl. "perceptual concept") oder, zum anderen, eines (Verstandes-)Begriffs mit einem dazugehörigen Begriffsgehalt bzw. einem Begriffsinhalt, ein „semantisches Konzept“ (engl. "semantic concept").

Zum Begriff des sog. „Konzepts (i.w.S.)“ (engl. "concept") s. z.B. G. LAKOFF: What is a Conceptual System? In: W.F. OVERTON / D.S. PALERMO (Eds.): The Nature and Ontogenesis of Meaning. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 41-90 – D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 77-83 – E.E. SMITH / D.L. MEDIN: Categories and Concepts. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1981.

Mit Bezug zum (Neo-)Konnektionismus s. z.B. A. CLARK: Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1993 – T. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: The Concept of Representation and the Representation of Concepts in Connectionist Models. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 129-61 – M. DAVIES: Concepts, Connectionism, and the Language of Thought. In: W. RAMSEY / S. STICH / D. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Pragmatics and Cognition. Vol. 2. 1994. PP. 229-56.

Einen Überblick über eine Vielzahl von Konzeptmodellen in der Kognitionswissenschaft und der Dynamischen Systemtheorie bietet z.B. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 151-74.

Zum Begriff des sog. „perzeptuellen Konzepts“ (engl. "perceptual concept") s. z.B. D. PAPINEAU: Phenomenal and Perceptual Concepts. In: T. ALTER / Sv. WALTER (Eds.): Phenomenal Concepts and Phenomenal Knowledge. New Essays on Consciousness and Physicalism. Oxford University Press. Oxford. 2006. PP. 111-44, v.a. PP. 113-14, 114-15.

Zum Begriff des sog. „semantischen Konzepts“ (engl. "semantic concept") s. z.B. J. PRINZ: Concepts, Philosophical Issues about. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 659-66.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.430.

1717 S. Fn. 1716.

cept")¹⁷¹⁸ vorzustellen hat.

6.21 Im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus wird – im Rahmen eines vektorbasierten Repräsentationsformats – die dynamische Struktur eines (neuro-)mentalens bzw. (neuro-)kognitiven (Repräsentations-)Konzepts i.w.S., d.h. z.B. ein konkretes Perzept oder ein abstraktes semantisches Konzept i.e.S., als ein Nicht-Gleichgewichts(-schwingungs-)zustand¹⁷¹⁹ in einem n -dimensionalen Systemzustandsraum modelliert, und kann wie folgt skizziert werden: Ein internes neuromentales bzw. neurokognitives Konzept i.w.S. besteht dabei in einem parallelen und dynamischen Prozeß, der, kontrolliert anhand von (nichtlinearen) Aktivierungsfunktionen¹⁷²⁰ eine sensorische Information in Form eines eingegebenen (Daten-)Vektors auf der Basis einer numerischen Distanzmetrik, z.B. der EUKLIDischen Distanz, im Rahmen einer Ähnlichkeitstransformation in eine (völlig) verteilte konnektionistische Repräsentation in Form von Aktivierungs- und Synapsenvektoren abbildet, und, wie z.B. bei dem sog. "Self-Organizing (Feature) Map" T. KOHONEN's¹⁷²¹ oder bei der sog. "Adaptive Resonance Theory" St. GROSSBERG's und G.A. CARPENTER's¹⁷²², in einem dynamischen Prozeß, der, kontrolliert anhand von Lernalgorithmen, die statistischen Strukturrelationen der sensorischen Informationen, kodiert, d.h., aus den eingegebenen (Daten-)Vektoren somit eine gewisse Anzahl von statistischen Prototypen in Form von kohärenten und adaptiven dynamischen n -dimensionalen Vektorfeldern¹⁷²³ herausfiltert, sodaß in den so erzeugten lokalen Partitionen des Systemphasenraums eine gewisse Anzahl von (Klassifikations-)Klassen erzeugt werden, die als spezifische Wahrscheinlichkeitshypothesen – i.S. des (vorläufigen) Resultats der bisherigen Informationsverarbeitung – über zukünftige (neue) Daten interpretiert werden können. Diese Phasenraumkontraktionen bzw. Phasenraumkonvergenzen können dabei

- (1) im Rahmen einer attraktionstheoretischen Interpretation mit einem Attraktor- und Bifurkationsmodell, basierend auf den Fundamentalprinzipien der Kohärenz und Resonanz, in Form von Fixpunkt-, Grenzyklus- oder chaotischen Attraktoren, wie z.B. auch beim sog. "K0-KV Set Attractor Network Model" W.J. FREEMAN's¹⁷²⁴, beim sog. „Modularen Neurodynamischen System“ Fr. PASEMANN's¹⁷²⁵ und bei der sog. "Harmony Theory" P. SMOLENSKY's¹⁷²⁶, oder
- (2) im Rahmen einer oszillationstheoretischen Interpretation mit einem Eigenmodenmodell, basierend auf den Fundamentalprinzipien der HILBERT- Raum Analyse, in Form von Oszillationen, wie z.B. bei den sog. "Oscillatory Net-

1718 S. Fn. 1716.

1719 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.230, 1.25.01.

1720 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.211.

1721 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.1.

1722 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.1.

1723 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.221.

1724 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.01.1, 5.2.01.2.

1725 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.04.

1726 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.02.

works" M. WERNING's¹⁷²⁷, oder

(3) im Rahmen einer informationstheoretischen Interpretation mit einem Clustermodell, basierend auf dem Fundamentalprinzip der (Informations-)Entropie, in Form eines (funktionalen) Clusterindex und eines neuralen Komplexitätsindex, wie z.B. bei dem sog. "Functional Clustering Model" G.M. EDELMAN's und G. TONONI's¹⁷²⁸, oder dem "Free-Energy Principle" K. FRISTON's

als ein (Interpretations-)Modell für ein sensorisches, sensomotorisches, syntaktisch-semantisches oder motorisches Konzept aufgefaßt werden.

6.22 Auf der Basis der bisher analysierten, in ihrem Kern in mathematischer Notation verfaßten klassisch vektorbasierten, attraktorbasierten, oszillatorbasierten und entropiebasierten (Architektur-)Modelle¹⁷²⁹ wird – zum Zwecke der besseren Verständlichkeit – im Folgenden eine bildhafte Veranschaulichung der Kognitions- und Konzepttheorie im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus anhand der sog. „Gebirgssee-“ und „Gebirgsbach“-Metapher¹⁷³⁰ vorgenommen: Die Informationsverarbeitungsweise der (Langzeit-)Speicherung von sensorischer und syntaktisch-semantischer Information eines neuromentalen dynamischen Systems in Form des menschlichen Gehirns bzw. des menschlichen Geistes, modelliert anhand der besprochenen neurokognitiven Architekturen, kann mit einem Gebirgssee – i.S. der Metapher für das Langzeitgedächtnis – verglichen werden, der sich – in spontaner Aktivität¹⁷³¹ – selbst in Schwingung versetzt¹⁷³², sodaß sich eine Vielzahl von verschiedenen Wellen(-mustern)¹⁷³³ auf

1727 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.3.

1728 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.01.1.

1729 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4.

1730 S. auch die ähnlichen Überlegungen in Kl. MAINZER: Geist und Gehirn als komplexe Einheit. In: Daiseion-ji e.V. / Wilhelm Gottfried Leibniz Gemeinschaft e.V. (Hrsg.): 2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für integrative Wissenschaft. Verlag J.H. Röll. Bonn. 2006. S. 18-19.

In Betracht käme m.E. auch eine musiktheoretisch-harmonikale Metapher z.B. anhand eines Orchesters ohne einen Dirigenten oder, noch besser: einer Band, wie z.B. im Jazz.

Vgl. hierzu W. SINGER: Das Gehirn – ein Orchester ohne Dirigent. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft. Bd. 2. 2005. S. 15-18 – G. PIPA: Our Brain Plays Jazz. Information Processing in a Self-Organized and Multi-Scale System. Video. Redwood Center for Theoretical Neuroscience. February 24, 2010 – T. STONIER: Information and Meaning: An Evolutionary Perspective. Springer-Verlag. London u.a. 1997. PP. 203-204 mit seinem "Symphony Orchestra Model".

S. hierzu auch die Metapher des „Systems aus gekoppelten Federn“ (engl. "system of coupled springs") in G.M. EDELMAN / G. TONONI: A Universe of Consciousness: How Matter becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000. PP. 171-73.

1731 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 151-56, 174-78.

1732 Vgl. hierzu auch z.B. A.A. ANDRONOV / C.E. CHAITIN: Theory of Oscillations. Princeton University Press. Princeton. 1949.

S. auch A. PASLACK: Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991. S. 47-52, v.a. S. 50-51 mit dem Hinweis auf die Theorie der selbsterregten sog. „Autoschwingungen“ (engl. "autooscillations") i.S. A.A. ANDRONOV's.

1733 Vgl. auch T. STONIER: Information and Meaning: An Evolutionary Perspective. Springer-Verlag. London u.a. 1997. PP. 174-75, 199-221.

seiner Oberfläche abzeichnen. Der Wahrnehmungsvorgang kann nun dadurch beschrieben werden, daß eine Abfolge von Regenschauern auf die Oberfläche des Gebirgssees auftritt, wobei ein Regentropfen für ein basales sensorisches Informationselement steht, z.B. ein auf die Ganglionzellen der Retina auftreffendes Photon im Rahmen der visuellen Perzeption¹⁷³⁴, sodaß die Art und Weise, wie die Regentropfen auf die Wellenmuster der Seeoberfläche auftreffen, die Entstehung und das Fortbestehen von ganz bestimmten Wellenzügen bevorzugen bzw. begünstigen, wodurch sich schließlich eine einzige räumlich begrenzte Wellen(-muster-)form¹⁷³⁵ durchsetzen wird, oder sich zumindest nur eine geringe Anzahl von bestimmten Wellen(-muster-)formen, die dadurch dann eine bestimmte sensorische Information kodieren bzw. repräsentieren. Ein Regenschauer steht dabei für einen zu speichernden Sachverhalt, z.B. einen Gegenstand oder ein Ereignis, sodaß, je häufiger und ähnlicher eine bestimmte Art von Regenschauern auf die Wellenbewegungen der Seeoberfläche auftritt, desto mehr nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, daß sich eine ganz bestimmte Wellen(-muster-)form als Überlagerung der einzelnen Regenschauermuster ausbildet.¹⁷³⁶

Mit der Zeit wird dann eine allmähliche Abkühlung des Gebirgssees stattfinden, die dazu führt, daß die Wellen(-muster-)formen – zumindest zeitweise – eingefroren werden¹⁷³⁷, weshalb somit – in gewissen Grenzen – eine beständige Speicherung von Mustern gewährleistet wird, die jedoch bei Bedarf, z.B. wenn neue Informationen in bereits bestehende Muster eingebettet werden müssen, wieder zeitweise aufgetaut werden können.

Dazu entsprechend kann die Informationsverarbeitungsweise eines Denkvorganges, z.B. in Form einer kognitiven Inferenz, mit einem Netz aus miteinander rückgeführten und damit rückgekoppelten Gebirgsbächen – i.S. der Metapher für das Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnis – verglichen werden, die – gemäß der physikalischen Hydro- und Fluidodynamik¹⁷³⁸ – an kleineren und größeren Felsen im Bach bestimmte laminare und turbulente Wasserströmungen mit entsprechenden Wasserwirbeln erzeugt, sodaß sich die Informationsverarbeitung ebenfalls durch eine Vielzahl von verschiedenen Wellenausbreitungsmustern

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.231.

1734 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.40.

1735 Dies entspräche dann einer sog. „Eigenmode“ (engl. „eigenmode“) i.S. des sog. „Oscillatory Networks“ M. WERNING's.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.33.

1736 Dies entspräche den Prinzipien der sog. „Topologie-“ und „(Wahrscheinlichkeits-)Verteilungserhaltung“ (engl. „topology preservation“ und „distribution preservation“) beim „Self-Organizing (Feature) Map“ T. KOHONEN's.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.1.

1737 Zur Analogie des Einfrierens und Auftauens in Bezug auf die sog. (komputationale) Temperatur (eng. „computational temperature“) im Rahmen von Energiefunktionen in der statistischen Physik s. Kap. 4.3.02.3.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.23, 2.25, 5.2.06.

1738 Grundlegend s. z.B. L.D. LANDAU / E.M. LIFSHITZ: Fluid Mechanics. Pergamon Press. Reading/MA, Addison-Wesley Publ. 1959.

Einführend s. z.B. J. ZIEREP / K. BÜHLER: Grundzüge der Strömungslehre. Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide. 8. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2010.

auf der Oberfläche der Bäche abzeichnen würde.¹⁷³⁹ Ein Denkvorgang kann nun dadurch beschrieben werden, daß sich an bestimmten räumlich begrenzten Stellen trotz der stetigen Strömung des Bachwassers beständige Fließ- bzw. Nichtgleichgewichtsprozesse¹⁷⁴⁰ in Gestalt eben dieser relativ stationären Wasserwirbel bzw. Stromschnellen bilden, die damit den jeweils gerade bearbeiteten internen (Repräsentations-)Konzepten entsprechen würden, oder anhand der Rückführung einzelner Bachläufe anhand von Pumpen sich aufeinander einschwingende Kreisläufe ausbilden könnten, die damit einem rekurrenten Prozeßmechanismus entsprechen würden¹⁷⁴¹, und, als ein Resultat, einen resonanten Prozeß erzeugen könnten, was einem bestimmten Schlußfolgerungsergebnis entsprechen würde. Ferner kann man sich vorstellen, daß anhand der in den Gebirgssee einfließenden Bachströmungen die bereits bestehenden Wellen(-muster-)formen bei Bedarf dementsprechend angepaßt werden könnten, indem die gleichzeitige Ausbreitung der (neuen) Wellenbewegung – i.S. des Prinzips der neuronalen Synchronisation – bereits gespeicherte Wellen(-muster-)formen (wieder) in erhöhte (Eigen-)Schwingung versetzt und anschließend zum Teil überlagert bzw. überschreibt.¹⁷⁴²

6.23 Dieses generelle (Struktur-)Modell eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus zeichnet sich demnach dadurch aus, daß es im einzelnen anhand von vier basalen Charakteristika beschrieben werden kann:

6.231 Das erste Charakteristikum des generellen (Struktur-)Modells eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus besteht im (Wahrscheinlichkeits-)Wellen-, Schwingungs- bzw. Oszillationscharakter des dynamischen n -dimensionalen Vektorfelds im Systemphasenraum, das die interne neuromentale Repräsentation modelltheoretisch realisiert: Der (Wahrscheinlichkeits-)Wellencharakter eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. wird dabei bereits im Rahmen der sog. „Adaptiven Resonanztheorie“ (engl. „Adaptive Resonance Theory (ART)“)¹⁷⁴³ von St. GROSSBERG und D. SOMERS¹⁷⁴⁴ betont, indem der neuronale Klassifikationsprozeß anhand von resonanten Zuständen (engl. „resonant states“) in Form von resonanten stehenden Wellen (engl. „resonant standing waves“) modelliert werden kann. Daneben hat auch M. ABELES¹⁷⁴⁵ im Rahmen seines Modells der sog. „synfire chains“¹⁷⁴⁶ den (Wahrscheinlichkeits-)Wellencharakter hervorgehoben, indem der neuronale dynamische Bindungsprozeß anhand von synchronen neuronalen Aktivitätswellen (engl. „activity waves“) modelliert werden kann. Und schließlich wird der Oszillations-

1739 Dies entspräche der synchronen Ausbreitung von (vektoriellen) Aktivierungsmustern i.S. einer sog. „synfire wave“ bei dem „Synfire Chain (SFC) Model“ M. ABELES'.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.1.

1740 S. Fn. 1736.

1741 Dies entspräche einem rekurrenten, d.h. rückgekoppelten, Informationsverarbeitungsfluß im Rahmen des Simple Recurrent Network J.L. ELMAN's.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1742 S. Fn. 1751.

1743 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0, Fn. 1001.

1744 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.7, Fn. 1036.

1745 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.1, Fn. 1345, 1346.

1746 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.1, Fn. 1341.

charakter eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. vor allem im Rahmen der sog. „(Neuro-)Emulativen Semantik“ (engl. „(neuro-)emulative semantics“)¹⁷⁴⁷ von sog. „Oszillatorischen Netzwerken“ (engl. „Oscillatory Networks“)¹⁷⁴⁸ nach M. WERNING¹⁷⁴⁹ herausgestellt, indem anhand von synchronen Oszillationen bzw. Oszillationsfunktionen der gekoppelten Oszillatoren interne („(neuro-)mentale“) Repräsentationen von Objektkonzepten realisiert werden können, sodaß eine kompositionale modelltheoretische Semantik für eine (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung modelliert werden kann.¹⁷⁵⁰

6.232 Das zweite Charakteristikum des generellen (Struktur-)Modells eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus besteht im Konvergenzprozeß des dynamischen n -dimensionalen Vektorfelds im Systemphasenraum, das die interne neuromentale Repräsentation modelltheoretisch realisiert, sodaß, z.B. mittels der sog. „Multivaria(n)te Cluster Analysis (MCA)“¹⁷⁵¹, des Kohärenzkriteriums im Rahmen des sog. „Parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling“¹⁷⁵² oder des sog. „Attractor Modeling“¹⁷⁵³ gewährleistet wird, daß eine relativ stabile Konzeptrepräsentation erzeugt werden kann, m.a.W. eine optimale Partitionierung des Systemzustandsraums vorgenommen werden kann: Dem damit zusammenhängenden sog. „Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma“ (engl. „stability-plasticity dilemma“)¹⁷⁵⁴ haben sich vor allem St. GROSSBERG und G.A. CARPENTER¹⁷⁵⁵ im Rahmen der sog. „Adaptiven Resonanztheorie“ (engl. „Adaptive Resonance Theory (ART)“)¹⁷⁵⁶ gewidmet.

6.233 Das dritte Charakteristikum des generellen (Struktur-)Modells eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus besteht in der adaptiven neurokognitiven Plastizität des Konvergenzprozesses des dynamischen n -dimensionalen Vektorfelds im Systemphasenraum, das die interne neuromentale Repräsentation modelltheoretisch realisiert: Mit dem damit zusammenhängenden sog. „Stabilitäts-Plastizitäts-Dilemma“ (engl. „stability-plasticity dilemma“)¹⁷⁵⁷ haben sich vor allem, wie bereits erwähnt, St. GROSSBERG und G.A. CARPENTER¹⁷⁵⁸ im Rahmen der sog. „Adaptiven Resonanztheorie“ (engl. „Adaptive Resonance Theory (ART)“)¹⁷⁵⁹ beschäftigt. Desweiteren hat sich auch T. KOHONEN¹⁷⁶⁰ im Rahmen seiner sog. „Selbstorganisierenden (Merkmals-)Karte“ (engl. „Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)“)¹⁷⁶¹ mit dem Problem der neuronalen (adaptiven) Plastizität auseinandergesetzt, was die sog.

1747 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.30, Fn. 1448, 1450.

1748 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.1, Fn. 1433, 5.3.01.30, Fn. 1445.

1749 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.32, Fn. 1467.

1750 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.

1751 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

1752 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.22.

1753 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.25.

1754 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0, Fn. 1004.

1755 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.1.

1756 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0, Fn. 1001.

1757 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0, Fn. 1004.

1758 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.1.

1759 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.0, Fn. 1001.

1760 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.1 a.E.

1761 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.0, Fn. 1002.

„Topologieerhaltung“ (engl. “topology preserving”) und sog. „Verteilungserhaltung“ (engl. “distribution preservation”) der betreffenden Synapsen- bzw. Referenzvektoren betrifft.

6.234 Das vierte Charakteristikum des generellen (Struktur-)Modells eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus besteht im (neuro-)dynamischen Charakter des n -dimensionalen Vektorfelds im Systemphasenraum, das die interne neuromentale Repräsentation modelltheoretisch realisiert, sodaß der modellierte kontinuierliche neuronale Vektor(-informations-)fluß im Rahmen eines Phasenportraits¹⁷⁶² eine angemessene Konzeptrepräsentation gewährleistet: Der (neuro-)dynamische Charakter eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. wird dabei vor allem von Fr. PASEMANN¹⁷⁶³ im Rahmen seines Modells der sog. „Neuromodule“ (engl. “neuromodules”)¹⁷⁶⁴ herausgestellt, da eine neurokognitive Repräsentation nicht an spezifische statische Strukturelemente gebunden ist, sondern eine neurokognitive Funktion i.S. einer Transientendynamik von sich immer ein wenig verändernden dynamischen Strukturelementen ausgeführt wird. Ferner haben auch T. van GELDER¹⁷⁶⁵, zusammen mit Robert F. PORT¹⁷⁶⁶, mit ihrer sog. „Dynamischen (System) Hypothese“ (engl. “Dynamical (System) Hypothesis (D(S)H)”) ¹⁷⁶⁷ gefordert, daß gerade die kontinuierliche systemische Dynamik der (Neuro-)Kognition mit systemtheoretischen Methoden angemessen zu modellieren sei.

6.24 Mit diesem theoretischen (Struktur-)Modell eines neurokognitiven Konzepts i.w.S. im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus kann man nun – in Anlehnung an den Mathematiker und Kognitionswissenschaftler Herbert JAEGER¹⁷⁶⁸ – verschiedene Merkmale von mit experimentellen Belegen gestützten empirischen Konzepten i.w.S. beim Menschen, die vor allem aus der Kognitiven und Entwicklungspsychologie, der Psycho- und Kognitiven Linguistik und der Kognitionswissenschaft und Künstlichen Intelligenz stammen, grundsätzlich besser modellieren, u.z.:

- (1) die Zeitvariabilität,
 - (2) die Kontextabhängigkeit,
 - (3) die Selbstreferentialität, Iterativität und Zyklizität und
 - (4) die Gestaltkriterien
- von empirischen Konzepten.

1762 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.221.

1763 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.04.2, Fn. 1365.

1764 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.04.1, Fn. 1361.

1765 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.03.

1766 S. vor allem T. van GELDER / R.F. PORT: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: R.F. PORT / T.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 1-43.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.03.

1767 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.24.03, Fn. 145.

1768 Die weiteren Erörterungen orientieren sich an H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 151-74, v.a. S. 162-65.

6.3 DISKUSSION DER INTEGRATIVEN (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN IN BEZUG AUF DIE WAHRNEHMUNGSKOGNITION (LOW-LEVEL COGNITION): KOMPOSITUM IM SINNE DES "FEATURE BINDING" (PERZEPT) UND DESSEN MODELL EINER KOMPOSITIONALEN (NEURO-)SEMANTIK

6.30 Basierend auf den bereits dargestellten (komputationalen) theoretischen Modellen¹⁷⁶⁹ in den Kognitions- und Neurowissenschaften mit deren dynamischen und integrativen (Bindungs-)Mechanismen – in Form von temporalen (Synchronisations-)Mechanismen der neuronalen (Phasen-)Aktivität, wird in diesem Kapitel nun analysiert bzw. diskutiert, ob und inwieweit diese (neuro-)kognitiven Modelle das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general) binding problem")¹⁷⁷⁰ in Bezug auf die Wahrnehmungskognition (sog. "low-level cognition")¹⁷⁷¹ angemessen lösen können, d.h., inwieweit verschiedene sensorische Informationselemente, z.B. im Sinne von diversen Objekteigenschaften, dynamisch zu einer internen perzeptuellen Repräsentation, einem sog. „Perzept“ (engl. "percept")¹⁷⁷², z.B. einem visuellen oder auditiven Objekt, integriert bzw. gebunden werden können (sog. "feature binding"¹⁷⁷³ oder "feature linking"¹⁷⁷⁴).

6.31 Wie bereits erwähnt¹⁷⁷⁵, kann das (allgemeine) Bindungsproblem in Bezug auf die Wahrnehmungskognition aber nur dann angemessen gelöst werden, wenn ein (neuro-)kognitives System, bestehend z.B. aus den bereits dargestellten konnektionistischen Architekturmodellen, über derartige integrative (Synchronisations-)Mechanismen verfügt, sodaß damit eine (neuro-)kognitive Struktur erzeugt wird, die den von J.A. FODOR, Z.W. PYLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN¹⁷⁷⁶ oder von R. JACKENDOFF¹⁷⁷⁷ geforderten Kriterien für eine adäquate Theorie der Kognition genügt (sog. "FODOR/PYLYSHYN Challenge" bzw. sog. "JACKENDOFF's Challenges"), m.a.W. die diese relevanten Strukturmerkmale der menschlichen Kognition besitzt. Dabei wird sich die folgende Analyse weniger auf die Kriterien der Produktivität¹⁷⁷⁸ und der inferentiellen Systematizität¹⁷⁷⁹ von mentalen Repräsentationen, sondern vor allem auf die Diskussion des Problems der Systematizität und des damit zusammenhängenden Problems der syntaktischen und semantischen Kompositionalität von mentalen Repräsentationen

1769 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.15.

1770 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

1771 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.11.

1772 S. z.B. R.J. GERRIG / Ph.G. ZIMBARDO: Psychologie. 18. Aufl. Pearson Studium. 2008. S. 109-11.

1773 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

1774 S. z.B. St. GROSSBERG / D. SOMERS: Synchronized Oscillations During Cooperative Feature Linking in a Cortical Model of Visual Perception. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 453-66.

1775 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14, 2.242, 3.31, 5.11.

1776 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14, 5.11.

1777 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.11.

1778 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 293-96.

1779 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 303-305.

tionen konzentrieren¹⁷⁸⁰. Vor allem aber kann das (allgemeine) Bindungsproblem in Bezug auf die Wahrnehmungskognition nur dann angemessen gelöst werden, wenn die sog. „Superpositionskatastrophe“ (engl. „superposition catastrophe“)¹⁷⁸¹ i.S. Fr. ROSENBLATT's¹⁷⁸² vermieden wird (s. Graphik.50): Danach besteht die grundlegende Schwierigkeit darin, zwei zum selben Zeitpunkt präsentierte sensorische Objekte, die jeweils von einer Menge i.S. eines Verbandes (engl. „assembly“)¹⁷⁸³ von Neuronen (en-)kodiert bzw. repräsentiert werden, in derselben mentalen Operation zu (ko-)aktivieren, ohne daß diese Koaktivierung zu einer durchmischenden (Muster-)Überlagerung bei der Informationskodierung durch die beiden Neuronenpopulationen führt, sodaß die Information in Bezug auf eine bestimmte (Objekt-)Komponente nicht angemessen aus einem sensorischen Kompositum, z.B. einer visuellen Szene, herausgefiltert werden könnte, was jedoch notwendig wäre, damit dieses Kompositum in seine (Objekt-)Komponenten analysiert werden kann, m.a.W. die Information der Mengenzugehörigkeit in Bezug auf die beiden gegebenen, zugleich aktivierten Mengen von Neuronen würde verloren gehen.

6.320 In Anknüpfung an die sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. „symbolism vs. connectionism debate“)¹⁷⁸⁴ in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jhdts wird im Folgenden das zentrale Thema im Rahmen der Lösung des Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblems von mentalen

1780 Einführend s. z.B. A. CLARK / Chr. ELIASMITH: Philosophical Issues in Brain Theory and Connectionism. In: M. ARBIB (Ed.): Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. P. 886.

Eingehend s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

Einen kurzen Überblick hierzu bieten z.B. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 161 – M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 49-50.

1781 S. grundlegend z.B. Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. P. 96 – Chr. von der MALSBURG: Binding in Models of Perception and Brain Function. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. PP. 520-26, v.a. P. 520 – Chr. von der MALSBURG: Synaptic Plasticity as Basis of Brain Organization. In: J.P. CHANGEUX / M. KONISHI (Eds.): The Neural and Molecular Bases of Learning. Report of the Dahlem Workshop on the Neural and Molecular Bases of Learning. Berlin 1985, December 8-13. Wiley. Chichester u.a. 1987. PP. 411-31, v.a. PP. 414-17.

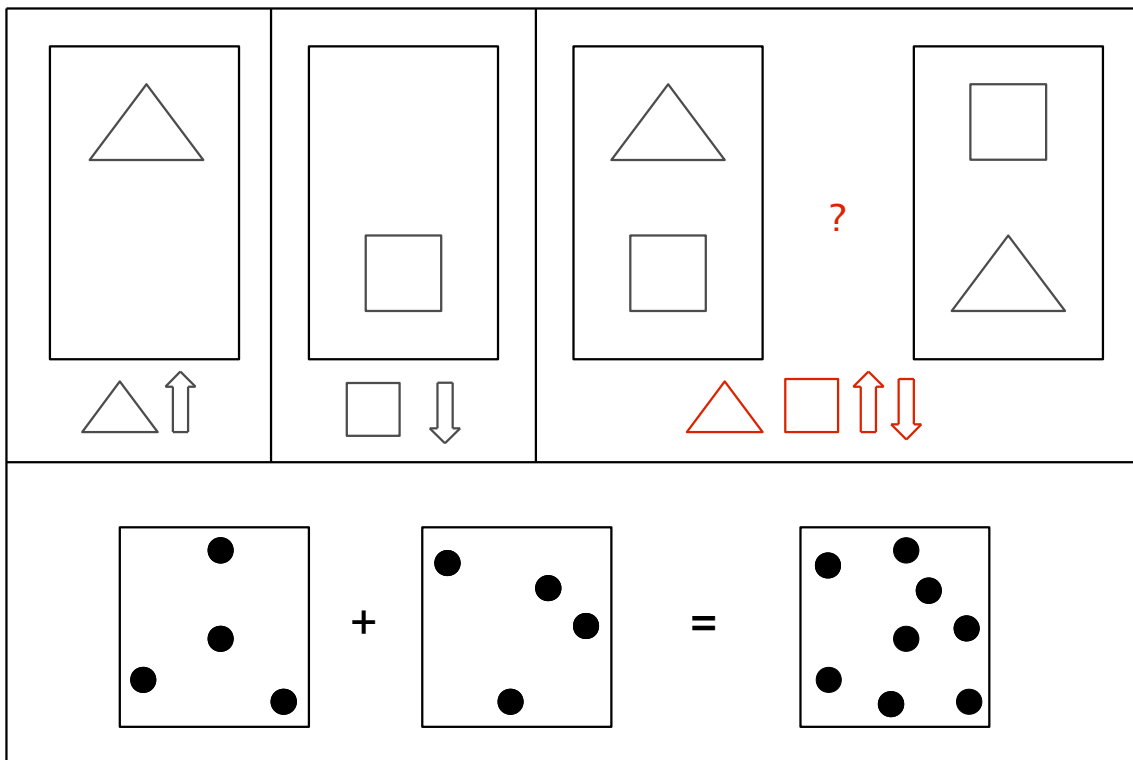
S. einführend z.B. Chr. von der MALSBURG: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-79 – V.G. HARDCASTLE: The Binding Problem. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. P. 558.

1782 S. Fr. ROSENBLATT: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism. Spartan Books. Washington D.C. 1962. PP. 73-74, 139, dessen Beispiel (s. Graphik.50) aufgegriffen wird bei Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. P. 96 – Chr. von der MALSBURG: Binding in Models of Perception and Brain Function. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. P. 520.

1783 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.243.

1784 Eingehend hierzu s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 4.1, 4.11-4.15. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009.

S. auch J. SCHRÖDER: Die Sprache des Denkens. Verlag. Königshausen & Neumann GmbH. Würzburg. 2001. S. 122-43.



Graphik.50: Schematische Darstellung der sog. „Superpositionskatastrophe“ (engl. „superposition catastrophe“) i.S. Fr. ROSENBLATT's: Aus Gründen der Vereinfachung wird ein visuelles Wahrnehmungssystem angenommen, dessen neuronales Netzwerk aus vier Neuronen besteht, wovon zwei Neuronen jeweils ein bestimmtes Objekt, z.B. ein Dreieck oder ein Viereck, erkennen, und die anderen beiden Neuronen die jeweilige Position des betreffenden Objekts, z.B. in der oberen oder der unteren Hälfte des Bildes, anzeigen können. Wird nun nur ein Objekt gezeigt, kann eine eindeutige Zuordnung vorgenommen werden, z.B. '(Dreieck, oben)' oder '(Viereck unten)', während ein (Bindungs-)Problem dadurch entsteht, falls zwei Objekte simultan präsentiert werden: In diesem Fall wäre die Zuordnung der beiden Objekte zu ihren jeweiligen Positionen unklar, da die simultane (Ko-)Aktivierung von '(Dreieck, Viereck, oben, unten)' gedeutet werden könnte entweder als die Zuordnung '(Dreieck, oben)' und '(Viereck unten)', oder umgekehrt '(Dreieck, unten)' und '(Viereck oben)' (dargestellt in der oberen Hälfte der Graphik). Vereinfachend angenommen, daß die Aktivität eines Verbandes (engl. „assembly“) von zwei Neuronen ein bestimmtes Objekt bzw. die jeweilige Position des betreffenden Objekts kodieren könnten, so hätte man für die jeweiligen (Zuordnungs-)Kombinationen, z.B. '(Dreieck, oben)' oder '(Viereck unten)', vier aktive Neuronen, deren Mengenzugehörigkeit aber bei einem gleichzeitigen Auftreten von zwei Gegenständen verloren gehen würde, da die beiden Unterverbände, bestehend aus zusammen acht zugleich (ko-)aktiven Neuronen sich nun superponieren, d.h. überlagern, würden, sodaß damit auch die Information des Verbandes mit seiner internen (Propositions-)Struktur, z.B. 'Das Dreieck ist oben', verloren gehen würde (dargestellt in der unteren Hälfte der Graphik) (in Anlehnung an Chr. von der MALSBURG: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. Neuron. Vol. 24. 1999. P. 96 unter Bezugnahme auf Fr. ROSENBLATT: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism. Spartan Books. Washington D.C. 1962. PP. 73-74, 139).

Repräsentationen anhand von integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismen i.B.a. die sog. „Eigenschaftsbindung“ (engl. „feature binding“¹⁷⁸⁵) diskutiert, u.z. wird dabei insbesondere thematisiert werden, welche notwendi-

¹⁷⁸⁵ Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

gen und hinreichenden Bedingungen bzw. welche Kriterien für eine adäquate (Struktur-)Theorie der (Neuro-)Kognition im allgemeinen überhaupt relevant sind, und welche der analysierten theoretischen (Neuro-)Architekturen in den Kognitions- und Neurowissenschaften¹⁷⁸⁶ diese Bedingungen am besten erfüllt bzw. diesen Kriterien jeweils am besten genügt.

6.321 Der integrative, dynamische (Synchronisations-)Mechanismus in den erörterten theoretischen (Neuro-)Architekturen¹⁷⁸⁷, basierend auf den empirischen Daten der experimentellen Modelle¹⁷⁸⁸ in den Kognitions- und Neurowissenschaften i.B.a. die sog. „Eigenschaftsbindung“ (engl. “feature binding”)¹⁷⁸⁹, besteht nun in den Oszillator-basierten Architekturtypen¹⁷⁹⁰, im allgemeinen, darin, daß über einen hinreichend langen Zeitraum hinweg diejenige Oszillatorpopulation, die eine Eigenschaft eines sensorischen Objekts anhand einer Oszillationsfunktion kodiert bzw. anhand eines neuronalen Oszillationsmusters repräsentiert, stabil synchronisiert oszilliert mit derjenigen Oszillatorpopulation, die eine andere Eigenschaft dieses sensorischen Objekts anhand einer Oszillationsfunktion kodiert bzw. anhand eines neuronalen Oszillationsmusters repräsentiert, m.a.W., es hat eine hinreichend stabile synchrone Oszillation der neuronalen (Phasen-)Aktivität zwischen diesen Oszillatorpopulationen stattzufinden, um verschiedene Eigenschaften desselben Objekts zusammenzubinden, währenddessen diejenigen Oszillatorpopulationen ihre Aktivität dazu desynchronisieren, die z.B. eine Eigenschaft eines davon verschiedenen Objekts kodieren.

6.322 Beruhend vor allem auf der empirischen sog. „Synchronisationsbindungs-hypothese“ (engl. “Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis”)¹⁷⁹¹ nach W. SINGER, A.K. ENGEL und P. KÖNIG et al., hat in grundlegender Weise im Konnektionismus M. WERNING¹⁷⁹² mit seinem mathematischen Modell der sog. „Oszillatori-

1786 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.14.

1787 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.14.

1788 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 3.3, 3.4.

1789 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3.01, 4.4.01, 4.4.02, 5.2.01, 5.3.01, 5.3.02.

1790 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2 und 5.3.

1791 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.423.

1792 S. z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-54, v.a. PP. 653-54: “The meaning of a sentence is a set of eigenmodes. We can regard it as an internal propositional representation. Since the meanings of constants and predicates are internal representations and co-vary with what they denote, the sets of eigenmodes can be mapped one-to-one to sets of models or possible worlds built from the denoted objects and properties. If one takes propositions to be sets of models or possible worlds, as is commonly done, and if one assumes that propositions are the denotations of sentences, we have a one-to-one mapping between the internal propositional representations of the network and the denotations of the sentences that express them. We may hence infer that the principle of content co-variation is fulfilled for the triples <constant term, internal object representation = oscillation, denoted object>, <predicate, internal object representation = feature layer, denoted property>, sentence, internal propositional representation = set of eigenmodes, denoted proposition>.

The co-variation between the internal representations generated by the network and expressed by the terms of the language, on the one side, and the denotations of the expressions, on the other side, are one-to-one. Moreover, the semantic operations used to construct our neuronal semantics are also completely analogous to those used in the denotational semantics of standard model theory. It can thus be immediately shown that the neuronal structure *N*, which pro-

schen Netzwerke“ (engl. “oscillatory networks”)¹⁷⁹³, dessen neuronale Struktur eine neurobiologisch realistische, kompositionale, nicht-symbolische modelltheoretische Semantik für eine (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung darstellt (sog. „(Neuro-)Emulative Semantik“ (engl. “(neuro-)emulative semantics”), so daß Bedeutungen als mengentheoretische Konstruktionen dieser neuronalen Strukturen aufgefaßt werden können, einen temporalen (Synchronisations-)Mechanismus in Form der sog. „Eigenmodenanalyse“ (engl. “eigenmode analysis”) entwickelt, sodaß das sog. „Eigenschaftsbindungsproblem“ (engl. “feature binding problem”)¹⁷⁹⁴ formal-mathematisch prinzipiell überzeugend gelöst werden kann: Das mathematisch-logische Modell der Oszillatorischen Netzwerke beschreibt dabei, wie – in der Zeit – anhand von neuronalen kortikalen Strukturelementen in Form von gekoppelten Oszillatoren eine interne kompositionale Repräsentation erzeugt wird, bezogen auf einen bestimmten visuellen Wahrnehmungssachverhalt, sodaß die Bezugnahme eines sprachlichen Ausdrucks im Rahmen einer monadischen Prädikaten-sprache erster Ordnung mit Identität auf einen äußeren Sachverhalt in der Welt, gegeben anhand der Informationen im jeweiligen rezeptiven Feld, gewährleistet wird. Dies hat zur Konsequenz, daß dadurch beschrieben werden kann, wie einem bestimmten neuronalen temporalen (Synchronisations-)Prozeß ein Bedeutungsgehalt zugesprochen werden kann, der – im Rahmen eines (visuellen) Wahrnehmungsvorgangs – einem sprachlichen Ausdruck einen wahrgenommenen (Prädikations-)Sachverhalt zuordnet, was somit von M. WERNING als neuronale Extension (engl. “neural extension”)¹⁷⁹⁵ bezeichnet wird. Dies impliziert damit eine isomorphe Abbildung von diskreten Symbolstrukturen dieser Prädikaten-sprache erster Ordnung und ihren Denotationen in kontinuierliche Oszillation(-sfunktion-)en der Neuronen des Oszillatorischen Netzwerks, da diese neuronalen Strukturelemente im Sinne eines Isomorphismus kovariieren mit den externen (Informations-)Gehalten des physikalischen perzeptiven sog. „Stimulus“ (engl. “stimulus”), die identisch sind mit der Standard-modelltheoretischen Struktur der Denotationen der Ausdrücke dieser (Prädikaten-)Sprache, sodaß ein Oszillatorisches Netzwerk mit seiner neuronalen (Oszillations(-funktions)- bzw. Eigenmoden-)Struktur damit eine nicht-symbolische sog. „algebraische Emulation“ (engl. “algebraic emulation”) dessen erzeugt, was es im Rahmen seiner Perzeption, basierend auf dem Konzept des rezeptiven Feldes, repräsentiert.

6.322.1 Was einen integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus für das Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblem von mentalen Reprä-

vides a semantics of internal representations of our language, is strictly isomorphic to the denotational semantics one would get in the standard model-theoretical approach. This isomorphism justifies the claim that the neuronal structure is an emulative semantics of a first-order language. It is non-symbolic because it is isomorphic to a denotational semantics as provided by standard model theory and thus violates the principle of semantic constituency. Each element of a denotational semantics for the perceptual expressions used in our language has a counterpart in the neuronal structure: its emulation.”

1793 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.3.01.2, 5.3.01.3.

1794 S. z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 639-44.

1795 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.34.

sentationen im Rahmen seiner emulativen Neurosemantik betrifft, knüpft dabei M. WERNING¹⁷⁹⁶ an die fundamentale Kritik am Konnektionismus¹⁷⁹⁷ seitens der Symboltheoretiker J.A. FODOR, Z.W. PYLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN an¹⁷⁹⁸: Mit J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁷⁹⁹ hat man von der Grundannahme auszugehen, daß ein (neuro-)kognitives System, damit es die grundlegenden (Struktur-)Eigenschaften für eine adäquate Theorie der Kognition besitzt, vor allem dem Kriterium der sog. „Systematizität“ (engl. „systematicity”)¹⁸⁰⁰ zu genügen hat, d.h., es besteht eine nomologische Korrelation zwischen dem (Leistungs-)Vermögen (engl. “capacity”) des Systems, im Rahmen eines intentionalen Zustands in einem bestimmten Modus einen Satz mit einem bestimmten (semantischen) Gehalt zu erzeugen, und dem Vermögen, einen anderen Satz mit einem verwandten (semantischen) Gehalt und einer strukturidentischen Syntax zu erzeugen. Dies kann jedoch nur gewährleistet werden, wenn das System die komplexen mentalen Repräsentationen aus jeweils demselben Typ von repräsentationalen Elementen und denselben Operationen erzeugt, wobei als notwendige Voraussetzung des Kriteriums der Systematizität deshalb entweder syntaktisch oder semantisch kompositionale Operationen zur Kombination von komplexen mentalen Repräsentationen in Betracht kommen.¹⁸⁰¹

Das sog. „Prinzip der Kompositionalität (der Bedeutung)“ (engl. “principle of compositionality (of meaning)”) ^{1802,1803} kann man dabei z.B., ganz allgemein und

1796 S. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 300-303.

1797 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

1798 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

1799 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.142, 2.143.

1800 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 300-303.

1801 Vgl. z.B. M. WERNING: Kompositionalität und die Basis mentaler Begriffe. Powerpoint Präsentationsmanuskript. S. 5.

1802 Einführend s. z.B. Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. PP. 417-73, v.a. PP. 419-21, 447-53 – P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality. In: Kl. von HEUSINGER / Cl. MAIENBORN / P. PORTNER (Eds.): Semantics. An International Handbook of Natural Language Meaning. Vol. 1. Mouton de Gruyter. Berlin. 2008. PP. 96-123 – J. DEVER: Compositionality. In: E. LEPORE / B. SMITH: The Oxford Handbook of Philosophy of Language. Oxford University Press. 2006. PP. 633-66 – Z.G. SZABÓ: Compositionality. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (February 14, 2007 Edition).

Eingehend s. z.B. P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality I. Definitions and Variants. Philosophy Compass. Vol. 5. 2010. PP. 265-82 – P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality II. Arguments and Problems. Philosophy Compass. Vol. 5. 2010. PP. 250-64 – F.J. PELLETIER: The Principle of Semantic Compositionality. Topoi. Vol. 13. 1994. PP. 11-24, v.a. P. 2.

Der Begriff „kompositional“ (engl. “compositional”) wird erstmals – unter Verweis auf N. CHOMSKY – bei J.J. KATZ: Philosophy of Language. Harper & Row. New York. 1966. P. 152 verwendet.

1803 Davon zu unterscheiden ist dabei das sog. „Prinzip der Kompositionalität (der Referenz)“ (engl. “principle of compositionality (of reference)”), das man z.B., ganz allgemein und informell, wie folgt definieren kann:

“For every complex expression *e* in *L*, the reference of *e* in *L* is determined by the structure of *e* in *L* and the references of the constituents of *e* in *L*.”

S. Z.G. SZABÓ: Compositionality. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy

informell, wie folgt definieren:

“The meaning of a complex term is a syntax-dependent function of the meanings of its syntactic parts.”¹⁸⁰⁴

“The meaning of a compound expression is a function of the meanings of its parts and of the syntactic rule by which they are combined.”¹⁸⁰⁵

“For every complex expression e in L , the meaning of e in L is determined by the structure of e in L and the meanings of the constituents of e in L .”¹⁸⁰⁶

Das Prinzip der Kompositionalität wird dabei, im allgemeinen, auf den Logiker, Mathematiker und Philosophen Gottlob FREGE¹⁸⁰⁷ zurückgeführt, wobei manchmal auch vom „FREGE-Prinzip“ (engl. “FREGE's Principle”)¹⁸⁰⁸ gesprochen wird, und z.B. auf die folgenden Textstellen Bezug genommen wird:

„Erstaunlich ist es, was die Sprache leistet, indem sie mit wenigen Silben unübersehbar viele Gedanken ausdrückt, daß sie sogar für einen Gedanken, den nun zum ersten Male ein Erdbürger gefaßt hat, eine Einkleidung findet, in der ihn ein anderer erkennen kann, dem er ganz neu ist. Dies wäre nicht möglich, wenn wir in dem Gedanken nicht Teile unterscheiden könnten, denen Satzteile entsprächen, so daß der Aufbau des Satzes als Bild gelten könnte des Aufbaues des Gedankens (...).

Sieht man so die Gedanken an als zusammengesetzt aus einfachen Teilen und läßt man diesen wieder einfache Satzteile entsprechen, so wird es begreiflich, daß aus wenigen Satzteilen eine große Mannigfaltigkeit von Sätzen gebildet werden kann, denen wieder eine große Mannigfaltigkeit von Gedanken entspricht.“¹⁸⁰⁹

(February 14, 2007 Edition).

1804 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 634.

1805 S. B.H. PARTEE / A. ter MEULEN / R.E. WALL: Mathematical Methods in Linguistics. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1990. P. 318 – Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. P. 447.

1806 S. Z.G. SZABÓ: Compositionality. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (February 14, 2007 Edition).

1807 Grundlegend s. z.B. G. FREGE: Logische Untersuchungen. Dritter Teil: Gedankengefüge. Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus. Hf. 3. 1923-26. S. 36-51 (wiederabgedruckt in G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966. S. 72-91, v.a. S. 72) – G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962. S. 40-65, v.a. S. 46-47, 49.

1808 S. z.B. M. DUMMETT: Frege: Philosophy of Language. 2nd. Ed. Harvard University Press. Cambridge. 1981.

Einführend s. z.B. Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. PP. 420-21.

Zur Kritik hieran s. z.B. F.J. PELLETIER: The Principle of Semantic Compositionality. Topoi. Vol. 13. 1994. PP. 11-24.

1809 S. G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966. S. 72.

„Wir fragen nun nach Sinn und Bedeutung eines ganzen Behauptungssatzes. Ein solcher Satz enthält einen Gedanken. (...) Nehmen wir einmal an, der Satz habe eine Bedeutung! Ersetzen wir nun in ihm ein Wort durch ein anderes von derselben Bedeutung, aber anderem Sinne, so kann dies auf die Bedeutung des Satzes keinen Einfluß haben.“¹⁸¹⁰

„Wenn unsere Vermutung richtig ist, daß die Bedeutung eines Satzes sein Wahrheitswert ist, so muß dieser unverändert bleiben, wenn ein Satzteil durch einen Ausdruck von derselben Bedeutung, aber anderem Sinn ersetzt wird.“¹⁸¹¹

6.322.2 Das moderne Prinzip der sog. „syntaktischen Kompositionalität“ (engl. „syntactic compositionality“)¹⁸¹² kann, basierend auf dem Begriff der syntaktisch kompositionalen Operation, wie folgt definiert werden: Eine Operation ist syntaktisch kompositional, wenn und nur wenn die Form bzw. die syntaktische Struktur einer komplexen Repräsentation abhängig und (funktional) determiniert ist von der Form bzw. der syntaktischen Struktur der elementaren Repräsentationen, d.b., daß die Bedeutung eines komplexen Terms eine Funktion der syntaktischen Struktur der einzelnen syntaktischen Konstituenten dieses komplexen Terms ist, die eine bestimmte Bedeutung haben.

Da man bei der Erzeugung und Verwendung von idiomatischen Begriffen einen Ausdruck erhalten kann, der zwar syntaktisch kompositional ist, aber keine nomologische Korrelation zwischen inhaltlich verwandten intentionalen Zuständen erlaubt¹⁸¹³, stellt das Prinzip der syntaktischen Kompositionalität keine notwendige Bedingung für das Kriterium der Systematizität und damit für eine adäquate Theorie der Kognition dar.

6.322.3 Das moderne Prinzip der sog. „semantischen Kompositionalität“ (engl. „semantic compositionality“)¹⁸¹⁴ kann, basierend auf dem Begriff der seman-

1810 S. G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962. S. 46-47.

1811 S. G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962. S. 49.

1812 Vgl. z.B. M. WERNING: Kompositionalität und die Basis mentaler Begriffe. Powerpoint Präsentationsmanuskript. S. 7 – M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 41-44.

1813 S. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 300-301.

1814 Grundlegend s. z.B. W. HODGES: Formal Features of Compositionality. Journal of Logic, Language and Information. Vol. 10. 2001. PP. 7-28, v.a. PP. 12-15.

Eingehend s. z.B. M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. PP. 146-51 – M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference held in November Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 261-65, v.a. PP. 262-65 – M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 285-87 – M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 283-85 – M. WERNING: The Temporal Dimension of

tisch kompositionalen Operation, wie folgt definiert werden: Eine Operation ist semantisch kompositional, wenn und nur wenn der semantische Wert einer komplexen Repräsentation abhängig und (funktional) determiniert ist von den semantischen Werten ihrer elementaren Repräsentationen, d.h., daß die Bedeutung eines komplexen Terms eine syntaxabhängige Funktion der Bedeutungen der einzelnen syntaktischen Konstituenten dieses komplexen Terms ist¹⁸¹⁵, d.h., die sog. „Definition der formalen Kompositionalität“ (engl. “definition of formal compositionality”) der Semantik einer Sprache i.S. eines Homomorphismus (engl. “homomorphism”)¹⁸¹⁶ zwischen zwei algebraischen Strukturen, u.z. von der syntaktischen Struktur der Terme $\langle T, \Sigma_T \rangle$ in die semantische Struktur einer Sprache $\langle M, \Sigma_M \rangle$, lautet^{1817,1818}:

Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 203-208 – M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-35.

1815 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 634: “Principle 1 (Compositionality of meaning) *The meaning of a complex term is a syntax-dependent function of the meanings of its syntactic parts.*”

S. auch z.B. M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. PP. 145-78, v.a. PP. 145, 151.

Vgl. auch M. WERNING: Kompositionalität und die Basis mentaler Begriffe. Powerpoint Präsentationsmanuskript. S. 7.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.3.01.30.

1816 S. hierzu z.B. Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. P. 450 – Th. JANSSEN: Foundations and Applications of Montague Grammar. Part 1: Philosophy, Framework, Computer Science. Centrum voor Wiskunde en Informatica. Amsterdam. 1986. P. 22 – R. MONTAGUE: Universal Grammar. Theoria. Vol. 36. 1970. P. 376.

Zum Begriff des sog. „Homomorphismus“ (engl. “homomorphism”) i.S. einer linearen Abbildung in der Mathematik s. z.B. B. HUPPERT / W. WILLEMS: Lineare Algebra. Mit zahlreichen Anwendungen in Kryptographie, Codierungstheorie, Mathematischer Physik und Stochastischen Prozessen. 2. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2010. S. 84-85 – S. BOSCH: Algebra. 6. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006. S. 13-14 – M.P.H. WOLFF / P. HAUCK / W. KÜCHLIN: Mathematik für Informatik und Bioinformatik. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004. S. 92-93 – B. PAREIGIS: Lineare Algebra für Informatiker. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. S. 97-98.

1817 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 635.

S. auch M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 287 – M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference held in Bonn 10-13. 2000. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 263-64 – M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. PP. 149-51 – M. WERNING: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 205-206.

Eingehend zur modernen formalen Definition der semantischen Kompositionalität s. z.B. W. HODGES: Formal Features of Compositionality. Journal of Logic, Language and Information. Vol. 10.

“(Formal Compositionality) Given a language with the syntax $\langle T, \Sigma_T \rangle$, a meaning function $\mu: T \rightarrow M$ is called compositional just in case, for every n -ary syntactic operation $\sigma \in \Sigma_T$ and any sequence of terms t_1, \dots, t_n in the domain of σ , there is a partial function m_σ defined on M^n such that

$$\mu(\sigma(t_1, \dots, t_n)) = m_\sigma(\mu(t_1), \dots, \mu(t_n)). \quad (191)$$

A semantics induced by a compositional meaning function will be called a compositional semantics of the language.”

Somit stellt das Prinzip der semantischen Kompositionalität eine notwendige Bedingung¹⁸¹⁹ für das Kriterium der Systematizität und damit für eine adäquate Theorie der Kognition dar.

6.322.4 Das Prinzip der (semantischen) Kompositionalität setzt folglich die syntaktische Konstituentenstruktur von Sätzen bzw. von komplexen mentalen Repräsentationen voraus (Prinzip der sog. „syntaktischen Konstituenz“ (engl. “syn-

2001. PP. 12, 14-15 – R. MONTAGUE: Universal Grammar. *Theoria*. Vol. 36. 1970. PP. 373-98, v.a. PP. 375-78 – Th. JANSSEN: Foundations and Applications of Montague Grammar. Part 1: Philosophy, Framework, Computer Science. Centrum voor Wiskunde en Informatica. Amsterdam. 1986. P. 17 – P. HENDRIKS: Compositionality and Model-Theoretic Interpretation. *Journal of Logic, Language and Information*. Vol. 10. 2001. PP. 29-48, v.a. PP. 32-33 – B. PARTEE / A. ter MEULEN / R. WALL: Mathematical Methods in Linguistics. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1990. PP. 334-36. Einführend hierzu s. z.B. Th.M.V. JANSSEN: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): *Handbook of Logic and Language*. Elsevier. Amsterdam. 1997. PP. 447-53 – P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality. In: Kl. von HEUSINGER / Cl. MAIENBORN / P. PORTNER (Eds.): *Semantics. An International Handbook of Natural Language Meaning*. Vol. 1. Mouton de Gruyter. Berlin. 2008. PP. 99-100 – Z.G. SZABÓ: Compositionality. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (February 14, 2007 Edition) – P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: Compositionality I. Definitions and Variants. *Philosophy Compass*. Vol. 5. 2010. PP. 265-82, v.a. P. 254.

1818 Von dieser sog. „Funktionsversion der Kompositionalität“ (engl. “function version of compositionality”) wird bisweilen, mit Bezug auf G. FREGE: *Über Sinn und Bedeutung*. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): *Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien*. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962. S. 46-47, 49, die sog. „Substitutionsversion der Kompositionalität“ (engl. “substitution version of compositionality”) unterschieden.

S. hierzu im einzelnen P. PAGIN / D. WESTERSTÅHL: *Compositionality I. Definitions and Variants*. *Philosophy Compass*. Vol. 5. 2010. PP. 265-82, v.a. PP. 251, 254.

S. auch J. DEVER: *Compositionality*. In: E. LEPORE / B. SMITH: *The Oxford Handbook of Philosophy of Language*. Clarendon Press. Oxford. 2008. PP. 635-40.

S. dazu auch die Ausführungen in Fn. 1802, 1803.

1819 S. hierzu z.B. M. WERNING: *Right and Wrong Reasons for Compositionality*. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): *The Compositionality of Meaning and Content*. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 300-303, v.a. PP. 302-303, der – unter Bezugnahme auf Ed. HUSSERL: *Logische Untersuchungen*. Meiner. Hamburg. (1900/1901) 2009 – darauf hinweist, daß jedoch das Prinzip der semantischen Kompositionalität keine hinreichende Bedingung sei, um eine systematische Korrelation zwischen zwei Sätzen festzustellen, da dafür auch die Feststellung erforderlich sei, daß die verwendeten permutierten Wörter derselben sog. „Bedeutungskategorie“ bzw. der „semantischen Kategorie“ (engl. “semantic category”) angehören.

tactic constituency")¹⁸²⁰), woraus dann, z.B. von G. FREGE¹⁸²¹ mit seiner klassischen Formulierung der Kompositionalität und den Symboltheoretikern J.A. FODOR¹⁸²² und Br.P. McLAUGHLIN¹⁸²³, zusätzlich das Prinzip der sog. „semantischen Konstituenz“ (engl. “semantic constituency”)¹⁸²⁴ gefordert wird, wobei man nach M. WERNING¹⁸²⁵ dabei zumindest auf einen weit gefaßten Begriff einer Teil/Ganzes-Beziehung (engl. “part-whole relation”)¹⁸²⁶ zurückgreift, der formal

-
- 1820 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 286-87: “(Syntactic constituency). A term *s* of a language *L* is called a syntactic part (or constituent) of a term *t* of *L* if and only if
- there is a partial function α from the *n*-th Cartesian product of the set of terms of *L* into the set of terms of *L* such that *t* is a value of the function α with *s* as one of its arguments and
 - there is a syntactic rule of *L* according to which $\alpha(s_1, \dots, s_n)$ is a well-formed term of *L* if α is defined for s_1, \dots, s_n and if s_1, \dots, s_n are well-formed terms of *L*.”
- S. auch M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. P. 147.
- 1821 S. G. FREGE: Compound Thoughts. In: P. GEACH / R.H. STOOHOFF (Eds. and Trans.): Logical Investigations. Gottlob Frege. Basil Blackwell. Oxford. 1923/1976. P. 55: “With a few syllables [language] can express an incalculable number of thoughts (...). This would be impossible, were we not able to distinguish parts in the thoughts corresponding to the parts of a sentence, so that the structure of the sentence serves as the image of the structure of the thought.”
Siehe hierzu auch das deutsche Zitat in Kap. 6.322.1.
- 1822 S. z.B. J. FODOR: Connectionism and the Problem of Systematicity (continued): Why Smolensky's Solution still doesn't work. Cognition. Vol. 62. 1997. PP. 110-14, v.a. PP. 112-13: “The connection with (1) (...) the constituency relation is a part/whole relation: If *C* is a constituent of *C**, then a token of *C* is a part of every token of *C**. More precisely, constituency is a *co-tokening* relation; that is, if *C* is a constituent of *C**, then it is metaphysically necessary that for every tokening of *C** there is a corresponding tokening of *C*.
(...)
The connection with (2) (...) If *R* is constituency, then (2) says that the semantics of complex representations derives from the semantics of *their parts*.”
Eingehend s. z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 636.
S. auch H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 100-101.
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.145, 6.322.4.
- 1823 S. z.B. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls. Philosophical Studies. Vol. 71. 1993. PP. 163-90, v.a. PP. 167-71.
Eingehend s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. S. 98-100.
S. auch Fn. 1826.
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.422.
- 1824 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 634: “Principle 2 (Semantic constituency) *There is a semantic part-whole relation on the set of meanings such that for every two terms, if the one is a syntactic part of the other, then the meaning of the former is a semantic part of the meaning of the latter.*”
Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.3.01.30.
- 1825 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: To-

wie folgt definiert werden kann¹⁸²⁷:

“(Part-whole Relation) A relation Ξ defined on a set X is called a part-whole relation on X just in case, for all $x, y, z \in X$ the following holds: (...)

(i) $x \Xi x$ (reflexivity). (192)

(ii) $x \Xi y \wedge y \Xi x \rightarrow x=y$ (anti-symmetry). (193)

(iii) $x \Xi y \wedge y \Xi z \rightarrow x \Xi z$ (transitivity).” (194)

Basierend auf eben diesem Prinzip der semantischen Konstitutivität als einem Grundpfeiler von symbolischen Bedeutungstheorien, kann man dann nach M. WERNING¹⁸²⁸ eine sog. „symbolische Semantik“ (engl. “symbolic semantics”)¹⁸²⁹, z.B. i.S.d. “Language of Thought“ J. FODOR's¹⁸³⁰, definieren gemäß:

“(Symbolic Semantics) Given a language with the syntax $\langle T, \Sigma_T \rangle$, a thereon defined syntactic part-whole relation Ξ_T and a meaning function $\mu: T \rightarrow M$, then its semantics $\langle M, \Sigma_M \rangle$ is symbolic if and only if there is a part-whole relation Ξ_M defined on M such that for all terms $s, t \in T$ the following holds:

$s \Xi_T t \rightarrow \mu(s) \Xi_M \mu(t)$.” (195)

6.322.5 Das (Simulations-)Modell der Oszillatorischen Netzwerke nach M. WERNING¹⁸³¹ modelliert eine dynamische Momentaufnahme einer einzelnen visuel-

wards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 634-35.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.3.01.30.

1826 Einen enger gefaßten Begriff einer Teil/Ganzes-Beziehung i.S. der sog. „mereologischen Konstituenz“ (engl. “syntactic constituency”) verwendet z.B. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism-/Classicism Battle to Win Souls. Philosophical Studies. Vol. 71. 1993. PP. 163-90.

S. hierzu z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 635 – M. WERNING: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. Erkenntnis. Vol. 60. 2004. P. 147 – M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. P. 286.

1827 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 635.

1828 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 636.

1829 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 636.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.3.01.30.

1830 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.145, 6.322.4.

1831 S. im einzelnen hierzu z.B. M. WERNING: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 285-86 – M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012.

len Szene im Rahmen des Arbeitsgedächtnisses mit der Konstitution von mindestens zwei verschiedenen, simultan gegebenen perzeptuellen Objekten, z.B. einem vertikalen roten Balken und einem horizontalen grünen Balken (s. Graphik.46). Die Bedeutung eines Satzes, der sich auf diesen Sachverhalt der Welt bezieht, besteht demnach in einer Menge von Eigenmoden: Jeweils eine, sich nicht mit anderen Eigenmoden überlagernde¹⁸³², Eigenmode in Form eines Eigenvektors beschreibt die (phasen-)synchrone Oszillation einer (Unter-)Menge von Oszillatoren zwischen verschiedenen Eigenschaftsschichten, die somit die interne Repräsentation – i.S. einer Emulation – eines perzeptuellen Objekts gewährleisten. Da dabei eine Eins-zu-Eins Kovariation besteht zwischen den internen Repräsentationen i.S. der neuronalen (Oszillations-)Struktur, zum einen, gegenüber den grammatischen Termen und den syntaktischen Operationen einer monadischen (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung, und, zum anderen, gegenüber den strukturellen Sachverhalten und Gegenständen eines Modells der Welt¹⁸³³, auf die anhand der sprachlichen Ausdrücke Bezug genommen wird, besteht eine isomorphe Abbildung zwischen den Sachverhalten der Welt und den internen propositionalen Repräsentationen in Form der Eigenmoden, und, da diese neuronale Struktur mit ihrer neuronalen Semantik auch isomorph zu einer denotationalen Standard-modelltheoretischen Sprache erster Ordnung mit einer kompositionalen Semantik ist, ist die betreffende interne Neurosemantik eine emulative und kompositionale Semantik, da jedes Element der denotationalen Semantik dieser Sprache erster Ordnung ein neuronales strukturelles Korrelat – i.S. einer isomorphen Transformationsrelation – im neuronalen Modell besitzt, eben seine Emulation.

Zusammenfassend kann man sagen, daß somit die Dynamik der Oszillatorischen Netzwerke M. WERNING's eine mengentheoretische, emulative Neurosemantik für eine monadische (Prädikaten-)Sprache erster Ordnung darstellt, die das Prinzip der semantischen Kompositionalität – i.S. des Prinzips der Kompositionalität der Bedeutung¹⁸³⁴ und der Definition der formalen Kompositionalität (der Semantik einer Sprache)¹⁸³⁵ – erfüllt¹⁸³⁶, und damit eine notwendige Bedin-

PP. 633-34, 653-54.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.31-34.

1832 S. hierzu z.B. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 647.

1833 S. hierzu im einzelnen M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 647, 653.

1834 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.1.

1835 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3.

1836 S. hierzu im einzelnen den Beweis in M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 651-53, v.a. P. 652, wobei bewiesen wird, daß es für jede syntaktische Operation σ der emulativen Neurosemantik, bezogen auf eine einstellige Prädikatensprache erster Ordnung ($PL^=$) mit Identität, Prädikation, Konjunktion, Disjunktion, Implikation, Negation, Existenz- und Universalquantor, eine semantische Operation m_σ gibt, die die Gleichung für eine sog. „kompositionale Bedeutungsfunktion“ (engl. “compositional meaning function”) im Rahmen der Definition der

gung für das Kriterium der Systematizität, wobei sie aber eine nicht-symbolische Semantik darstellt, d.h., nicht dem Prinzip der semantischen Konstituenz¹⁸³⁷ genügt.¹⁸³⁸ Desweiteren wird dabei die Eigenschaftsbindung in der Wahrnehmungskognition anhand des integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus im Rahmen der Eigenmodenanalyse¹⁸³⁹ mit einem sehr hohen Grad an neurobiologischer Plausibilität und auf eine m.E. sehr überzeugende Weise modelliert.

6.323 Diese demnach auf dem mathematischen Konzept der algebraischen Struktur begründete Definition der Kompositionalität i.S. M. WERNING's, hier deshalb als die Definition der sog. „strukturellen Kompositionalität“ (engl. “structural compositionality”) bezeichnet, ist nun von Bj.Chr. KRALEMANN¹⁸⁴⁰ kritisiert worden, der sich dabei auf die Definition der sog. „funktionalen Kompositionalität“ (engl. “functional compositionality”) i.S. T. van GELDER's¹⁸⁴¹ beruft: Dabei wirft Bj.Chr. KRALEMANN¹⁸⁴² – m.E. zu Recht – M. WERNING vor, die Position einer synchron-kausalen Konstituentenstruktur von kompositionalen Strukturen zu vertreten, d.h., ein semantisches Kompositum besitzt nur dann eine kompositionale Struktur des semantischen Gehalts, wenn es zusammen mit den syntaktischen Konstituenten in notwendiger Weise in einem bestimmten raum-zeitlichen Gebiet zum selben Zeitpunkt – eben synchron, oder hier besser: simultan – mit ihnen auftritt, sodaß eine kausal-funktionale Relation i.S. der funktionalen Kompositionalität als einer diakronen Relation somit keine Konstituentenstruktur definiert. Zwar hat M. WERNING diese Kompositionalitätsdefinition i.S. einer sog. „mereologischen Konstituenz“ (engl. “mereological constituency”)¹⁸⁴³ in frühen

formalen Kompositionalität erfüllt.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3, 5.3.01.30.

1837 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4.

1838 S. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 654.

1839 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.3.01.33.

1840 S. Bj.Chr. KRALEMANN: *Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze*. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 121-24, v.a. Fn. 300.

1841 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.422.

1842 S. Bj.Chr. KRALEMANN: *Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze*. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 121, v.a. Fn. 300 mit Bezug auf M. WERNING: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Networks. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): *Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. P. 1095 – M. WERNING: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): *Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference held in Bonn 10-13. 2000*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 265-67 – M. WERNING: *The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation*. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 206-208.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.3.01.0.

1843 Zur Definition der sog. „mereologischen Konstituenz“ (engl. “mereological constituency”) s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): *The Compositionality of Meaning and Content*. Vol. I: Foundational Issues. Ontos

Publikationen¹⁸⁴⁴ vertreten, dies jedoch in späteren Publikationen¹⁸⁴⁵ revidiert, sodaß seine nicht-symbolische emulative Neurosemantik weder dem Prinzip der semantischen Konstituenz¹⁸⁴⁶, z.B. i.S. J. FODOR's¹⁸⁴⁷, noch dem strengeren Prinzip der mereologischen Konstituenz, z.B. i.S. J. FODOR's und Br.P. McLAUGHLIN's¹⁸⁴⁸ im Rahmen ihres "co-tokening argument", zu genügen braucht, sodaß der Vorwurf Bj.Chr. KRALEMANN's sich nunmehr eher gegen letztere richten würde. Es wäre m.E. allerdings zu bemerken, daß sich das Argument der funktionalen Kompositionalität Bj.Chr. KRALEMANN's eher in Bezug auf die Diskussion über das "variable binding problem" anzuwenden wäre, da es sich hier um ein neurokognitives Modell der zwei- oder dreistelligen Relation handelt, deren anhand von Synchronisationsmechanismen konstruierten Konstituenten in Form von Bindungsvektoren, bestehend aus den Füller/Rolle-Bindungen, anhand der Operation der Vektoraddition¹⁸⁴⁹ noch in diakroner bzw. sequentieller Weise, d.h. im Rahmen einer zeitlichen Aufeinanderfolge von Berechnungsoperationen in einem bestimmten Zeitraum, unter einer funktionalen Perspektive zu einem – strukturierten¹⁸⁵⁰ – Kompositum mit einer kompositionalen Semantik (zusammen-)gebunden werden müssen, während es sich in der Diskussion über das "feature binding problem" – bisher vornehmlich – um ein neurokognitives Modell der einstelligen Prädikation handelt, deren Konstituenten in Form von Oszillatoraktivitäten, die aus simultan gegebenen sensorischen (Eigenschafts-)Informationen generiert werden, in einer parallelen Weise zu anhand von Synchronisationsmechanismen konstruierten Komposita in Form von Eigenmoden¹⁸⁵¹ mit einer Objektstruktur (zusammen-)gebunden werden, sodaß eine Anzahl von – unstrukturierten¹⁸⁵² – Objekten zu einem bestimmten Zeitpunkt zu einer visuellen Szene vereint werden.

6.33 Man kann nun i.S. eines Fazits zusammenfassend sagen, daß mit Bezug auf die Diskussion eines integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus in der Wahrnehmungskognition, d.h. das Bindungsproblem i.S. einer Eigenschaftsbindung betreffend, mit der (Bindungs-)Dynamik in der (Neuro-)Architektur der "Oscillatory Networks" nach M. WERNING eine – im Rahmen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus – emulative kompositionale Neurosemantik für eine monadische Prädikatensprache erster Ordnung erzeugt wird, die, das Problem der Superpositionskatastrophe vermeidend, das Problem der se-

Verlag. Frankfurt. 2005. P. 286.

1844 S. Fn. 1842.

1845 S. v.a. M. WERNING: Non-Symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-54, v.a. PP. 633-35, 635-38, 654.

S. dazu z.B. P. PAGIN / D. WESTERSTÄHL: Compositionality I. Definitions and Variants. Philosophy Compass. Vol. 5. 2010. PP. 250-64, v.a. PP. 261-62.

1846 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4.

1847 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4.

1848 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4 und 6.433.

1849 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213.

1850 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213.

1851 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 5.3.01.2, 5.3.01.33.

1852 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.212.

mantischen Kompositionalität mit einem sehr hohen Grad an neurobiologischer Plausibilität und auf eine m.E. sehr überzeugende Weise modelliert.

6.4 DISKUSSION DER INTEGRATIVEN (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN IN BEZUG AUF DIE SPRACHKOGNITION (HIGH-LEVEL COGNITION): KOMPOSITUM IM SINNE DES "VARIABLE BINDING" (KONZEPT UND PROPOSITION) UND DESSEN MODELL EINER KOMPOSITIONALEN (NEURO-)SEMANTIK

6.40 Basierend auf den bereits dargestellten (komputationalen) theoretischen Modellen¹⁸⁵³ in den Kognitions- und Neurowissenschaften mit deren dynamischen und integrativen (Bindungs-)Mechanismen in Form von temporalen (Synchronisations-)Mechanismen der neuronalen (Phasen-)Aktivität, wird in diesem Kapitel nun analysiert bzw. diskutiert, ob und inwieweit diese (neuro-)kognitiven Modelle das sog. „(allgemeine) Bindungsproblem“ (engl. "(general) binding problem")¹⁸⁵⁴ in Bezug auf die Sprachkognition (sog. "high-level cognition")¹⁸⁵⁵ angemessen lösen können, d.h., inwieweit verschiedene syntaktisch-semantische Informationselemente, z.B. im Sinne von diversen semantischen Konzepten, dynamisch zu einer internen syntaktisch-semantischen Repräsentation, einer sog. „Proposition“ (engl. "proposition")¹⁸⁵⁶, z.B. einem (Aussage-)Satz im Rahmen einer intentionalen¹⁸⁵⁷ propositionalen Einstellung (engl. "propositional attitude")¹⁸⁵⁸, integriert bzw. gebunden werden können (sog. "variable binding")¹⁸⁵⁹.

6.41 Wie bereits erwähnt¹⁸⁶⁰, kann das (allgemeine) Bindungsproblem in Bezug auf die Sprachkognition aber nur dann angemessen gelöst werden, wenn ein (neuro-)kognitives System, bestehend z.B. aus den bereits dargestellten konnektionistischen Architekturmodellen, über derartige integrative (Synchronisations-)Mechanismen verfügt, sodaß damit eine (neuro-)kognitive Struktur erzeugt wird, die den von J.A. FODOR, Z.W. PYLYSHYN und Br. McLAUGHLIN¹⁸⁶¹ oder von R. JACKENDOFF¹⁸⁶² geforderten Kriterien für eine adäquate Theorie der Kognition genügt (sog. "FODOR/PYLYSHYN Challenge" bzw. sog. "JACKENDOFF's Challenges"), m.a.W. die diese relevanten Strukturmerkmale der menschlichen Kognition besitzt. Dabei wird sich die folgende Analyse weniger

1853 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.15.

1854 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

1855 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.11.

1856 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.145.

1857 Zu dem Begriff der „Intentionalität“ (engl. "intentionality") bzw. der eines „intentionalen Zustands“ (engl. "intentional state") s. z.B. R.M. CHISHOLM: Intentionality. In: D.M. BORCHERT (Ed.): Encyclopedia of Philosophy. 2nd Ed. Thomson Gale. Detroit u.a. 2006. PP. 704-708 – U. CLAESGES: Intentionalität. In: J. RITTER / K. GRÜNDER (Hrsg.): Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 4. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1976. S. 475 – R. CRANE: The Mechanical Mind. A Philosophical Introduction to Minds, Machines and Mental Representations. 2nd Ed. Penguin. London. 2003. PP. 30-36.

1858 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.145.

1859 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

1860 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14, 2.242, 3.31, 5.11, 6.31.

1861 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14, 5.11.

1862 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.11.

auf die Kriterien der Produktivität¹⁸⁶³ und der inferentiellen Systematizität¹⁸⁶⁴ von mentalen Repräsentationen, sondern vor allem auf die Diskussion des Problems der Systematizität und des damit zusammenhängenden Problems der syntaktischen und semantischen Kompositionalität von mentalen Repräsentationen konzentrieren¹⁸⁶⁵:

6.420 In Anknüpfung an die sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. “symbolism vs. connectionism debate”)¹⁸⁶⁶ in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jhdts. wird im Folgenden das zentrale Thema im Rahmen der Lösung des Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblems von mentalen Repräsentationen anhand von integrativen, dynamischen (Synchronisations-) Mechanismen i.B.a. die sog. „Variablenbindung“ (engl. “variable binding”¹⁸⁶⁷) diskutiert, u.z. wird dabei insbesondere thematisiert werden, welche notwendigen und hinreichenden Bedingungen bzw. welche Kriterien für eine adäquate (Struktur-)Theorie der (Neuro-)Kognition im allgemeinen überhaupt relevant sind, und welches der analysierten theoretischen (Neuro-)Architekturen in den Kognitions- und Neurowissenschaften¹⁸⁶⁸ diese Bedingungen am besten erfüllt bzw. diesen Kriterien jeweils am besten genügt.

6.421 Der integrative, dynamische (Synchronisations-)Mechanismus in den erörterten theoretischen (Neuro-)Architekturen¹⁸⁶⁹, basierend auf den empirischen Daten der experimentellen Modelle¹⁸⁷⁰ in den Kognitions- und Neurowissenschaften i.B.a. die sog. „Variablenbindung“ (engl. “variable binding”)¹⁸⁷¹, besteht nun in den klassischen Vektor-basierten Architekturtypen¹⁸⁷², im allgemeinen, darin, daß über einen hinreichend langen Zeitraum hinweg diejenige Neuronenpopulation, die ein semantisches Konzept anhand eines Aktivierungsvektors kodiert bzw. anhand eines neuronalen Aktivierungsmusters repräsentiert, stabil synchronisiert oszilliert mit derjenigen Neuronenpopulation, die eine

1863 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 293-96.

1864 Eingehend s. z.B. M. WERNING: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 303-305.

1865 Einführend s. z.B. A. CLARK / Chr. ELIASMITH: Philosophical Issues in Brain Theory and Connectionism. In: M. ARBIB (Ed.): Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. P. 886.

Eingehend s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

Einen kurzen Überblick hierzu bieten z.B. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 161 – M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 49-50.

1866 Eingehend hierzu s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 4.1, 4.11-4.15. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

1867 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

1868 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.15.

1869 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 4.3, 4.4, 5.1-5.4, 6.15.

1870 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 3.3, 3.4.

1871 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01-5.1.10, 5.2.02, 5.2.03.

1872 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.

syntaktische Funktion bzw. Position anhand eines Aktivierungsvektors kodiert bzw. anhand eines neuronalen Aktivierungsmusters repräsentiert, m.a.W., es hat eine hinreichend stabile synchrone Oszillation der neuronalen (Phasen-)Aktivität zwischen diesen Neuronenpopulationen stattzufinden, um ein semantisches Konzept, z.B. i.S. eines sog. „Füllers“ (engl. “filler”) – als eines Werts – an eine syntaktische Funktion, z.B. i.S. einer sog. „Rolle“ (engl. “role”) – als einer Variable – zu binden (sog. „Füller/Rolle-Bindung“ (engl. “filler/role binding”)).¹⁸⁷³ 6.422¹⁸⁷⁴ In grundlegender Weise hat im Konnektionismus P. SMOLENSKY¹⁸⁷⁵ mit seinem mathematischen Modell der sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. “Tensor Product Representation (TPR)”) im Rahmen seiner ICS-Architektur¹⁸⁷⁶, beruhend vor allem auf der empirischen sog. „Synchronisationsbindungshypothese“ (engl. “Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis”)¹⁸⁷⁷ nach W. SINGER, A.K. ENGEL und P. KÖNIG et al., einen temporalen (Bindungs-)Mechanismus in Form der Füller/Rolle-Bindung im Rahmen der kognitiven Sprachverarbeitung entwickelt, sodaß das sog. „Variablenbindungsproblem“ (engl. “variable binding problem”)¹⁸⁷⁸ – in Anlehnung an das Prinzip der temporalen Synchronizität der neuronalen Aktivität i.S. von L. SHASTRI und V. AJJANAGADDE¹⁸⁷⁹ – formal-mathematisch prinzipiell überzeugend gelöst werden kann.

Eine Vielzahl von Autoren hat nun Kritik geübt an der mathematischen Konstruktion der Tensorprodukt-Repräsentation P. SMOLENSKY's, z.B. kritisiert R.F. HADLEY¹⁸⁸⁰, daß P. SMOLENSKY in seinen Arbeiten nicht anspreche, ob seine Tensorprodukt-Repräsentationen in einer Trainingsphase gelernt werden könne, da er nicht hinreichend begründen könne, wie seine „fest verdrahtete“ (engl. “hard-wired”) Konstruktion über (Lern-)Prozesse zu ihren Repräsentationen gelangen solle, m.a.W. wie sich die Verbindungsgewichte der (Bindungs-)Vektoren im Rahmen eines Lernverfahrens angemessen einstellen sollen, wohingegen P. SMOLENSKY dies m.E., zumindest im Ansatz, versucht aufzuzeigen, z.B.

1873 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213, 5.1.05.1, Graphik.38.

1874 Dieses Kapitel ist eine überarbeitete Fassung der Kapitel 5.522, 5.5231 und 5.53 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009.

1875 S. z.B. B.B. TESAR / P. SMOLENSKY: Synchronous Firing Variable Binding is a Tensor Product Representation with Temporal Role Vectors. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 870-73, v.a. P. 873 – P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 252-255, v.a. P. 253.

1876 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213, 5.1.01.214.

1877 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.423.

1878 S. z.B. B.B. TESAR / P. SMOLENSKY: Synchronous Firing Variable Binding is a Tensor Product Representation with Temporal Role Vectors. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. P. 870.

1879 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.05.1, Graphik.38.

1880 S. z.B. R.F. HADLEY: Systematicity in Connectionist Language Learning. Mind and Language. Vol. 9. No. 3. 1994. PP. 247-72, v.a. PP. 254-69.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.424.

mit seinem sog. "Tensor Product Production System (TPPS)"¹⁸⁸¹.

Ferner geben nun, was die rekursive Konstruktion dieser Rolle/Füller-Zuordnung im Tensorprodukt-Repräsentationsschema P. SMOLENSKY's betrifft, z.B. Chr. ELIASMITH und T.C. STEWART¹⁸⁸², T. PLATE¹⁸⁸³, L. NIKLASSON und M. BODÉN¹⁸⁸⁴, Fr. van der VELDE und M. de KAMPS¹⁸⁸⁵ und M. ROMBA¹⁸⁸⁶ zu bedenken, daß, da bei einer Verwendung von völlig verteilten Repräsentationen für jede Zuordnung aus einem Rollen- und einem Füllervektor eine eigene Bindungseinheit im Netzwerk vorgesehen werden müßte, die Anzahl der erforderlichen (Bindungs-)Neuronen polynomial¹⁸⁸⁷ mit der Tiefe der rekursiven (Vektor-)Struktur zunehmen

-
- 1881 Das sog. "Tensor Product Production System (TPPS)" ist dabei eine Weiterentwicklung des sog. "Distributed Connectionist Production System (DCPS)" D.S. TOURETZKY's und G.E. HINTON's. S. z.B. Ch.P. DOLAN / P. SMOLENSKY: Tensor Product Production System: A Modular Architecture and Representation. Connection Science. Vol. 1. 1989. PP. 53-68 mit Hinweis auf D.S. TOURETZKY / G.E. HINTON: A Distributed Connectionist Production System. Cognitive Science. Vol. 12. PP. 423-66 – Ch.P. DOLAN / P. SMOLENSKY: Implementing a Connectionist Production System Using Tensor Products. In: D. TOURETZKY / G. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 265-72. Einführend hierzu s. z.B. T.A. PLATE: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994. P. 52.
- S. auch P. SMOLENSKY: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 211-12, wobei ein Lernalgorithmus i.S. eines sog. "recirculation algorithm" unter Hinweis auf G.E. HINTON / J.L. McCLELLAND: Learning Representations by Recirculation. In: D.Z. ANDERSON (Ed.): Neural Information Processing Systems. American Institute of Physics. New York. 1988. PP. 358-66 verwendet wird.
- Eingehend hierzu s. z.B. P. SMOLENSKY: On Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Technical Report CU-CS-355-87. Department of Computer Science. University of Colorado/Boulder. 1987. PP. 43-55, v.a. PP. 52-55 – P. SMOLENSKY: A Method for Connectionist Variable Binding. In: Technical Report CU-CS-356-87. University of Colorado. Department of Computer Science. Boulder. 1987. PP. 5-7 – Ch.P. DOLAN: Tensor Manipulation Networks: Connectionist and Symbolic Approaches to Comprehension, Learning, and Planning. AI Laboratory Technical Report. University of California. Los Angeles/CA. 1989.
- 1882 S. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 604-607, v.a. P. 607.
- 1883 S. T. PLATE: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1006-1007.
- 1884 S. L. NIKLASSON / M. BODÉN: On Representing Structure and Structured Representations in Connectionist Networks. In: A. BROWNE (Ed.): Current Perspectives in Neural Computing. Institute of Physics. Bristol. 1997. PP. 20-50.
- 1885 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 69, Fn. 1.
- 1886 S. M. ROMBA: Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001. S. 319.
- 1887 Ein Bindungsvektor, resultierend aus einem Rollenvektor mit n Elementen und einem Füllervektor mit n Elementen, hätte somit n^2 Elemente.
Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213 mit Graphik.33.
S. hierzu z.B. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 258-63, v.a. P. 259.

würde, da Tensoren mit entsprechend höherem Rang verwendet werden müßten, was selbst P. SMOLENSKY¹⁸⁸⁸ einräumt.

M.E. stellt das generelle Schema der Tensor(-vektor-)produkt-Repräsentation im Prinzip eine überzeugende Technik dar, um eine Symbolstruktur in eine Vektorkonstruktion zu transformieren¹⁸⁸⁹, da hier die syntaktische Funktion oder Rolle der Konstituenten(-vektoren) mit berücksichtigt wird, indem die exakte strukturelle Position eines (Konstituenten-)Vektors im Parserstrukturbaum i.S. der syntaktischen Kompositionalität angegeben werden kann.

In ihrer fundamentalen Kritik am Konnektionismus¹⁸⁹⁰ bestreiten nun aber J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁸⁹¹, J.A. FODOR und Br.P. McLAUGHLIN¹⁸⁹² sowie Br.P. McLAUGHLIN¹⁸⁹³ und Z.W. PYLYSHYN¹⁸⁹⁴ entschieden, daß – im Gegensatz zur

1888 S. P. SMOLENSKY: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. *Artificial Intelligence*. Vol. 46. 1990. P. 172.

1889 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.214.

1890 Einen Überblick hierzu bieten z.B. R.J. MATTHEWS: Connectionism and Systematicity. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 687-90 – Chr. ELIASMITH / W. BECHTEL: Symbolic versus Subsymbolic. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 292 – W. RAMSEY: Connectionism, Philosophical Issues. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 186 – R.F. HADLEY: Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1151-52 – B. HAMMER: Compositionality in Neural Systems. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 245 – Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism. In: E. CRAIG (Ed.): *Concise Routledge Encyclopedia of Philosophy*. Routledge. London, New York. 1998. P. 167 – W. BECHTEL: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): *A Companion to the Philosophy of Mind*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. PP. 204-206 – K. AIZAWA: *The Systematicity Arguments*. Kluwer. Academic Publishers. Boston u.a. 2003. PP. 43-149.

Eingehend s. H. MAURER: *Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte*. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. PP. 53-71.

1891 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. *Cognition*. Vol. 28. 1988. PP. 12-15, 22-32, P. 50: "It's not enough just to stipulate systematicity; one is also required to specify a mechanism that is able to enforce the stipulation. To put it another way, it's not enough for a Connectionist to agree that all minds are systematic; he must also explain *how nature contrives to produce only systematic minds*. Presumably there would have to be some sort of mechanism, over and above the ones that Connectionism per se posits, the functioning of which insures the systematicity of biologically instantiated networks: (...) The only mechanism that is known to be able to produce persuasive systematicity is Classical architecture."

Siehe hierzu auch die Ausführungen in den Kap. 2.14, 2.141-2.143.

S. auch H. MAURER: *Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte*. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. Kap. 4.1, 4.11-4.13 und in Kap. 5.3, 5.411.

1892 S. J.A. FODOR / Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work. *Cognition*. Vol. 35. 1990. PP. 183-88, 196-204.

1893 S. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to win Souls. *Philosophical Studies*. Vol. 71. 1993. PP. 167-84 – Br.P. McLAUGHLIN: Systematicity, Conceptual Truth, and Evolution. In: Chr. HOOKWAY / D. PETERSON (Eds.): *Philosophy and Cognitive Science*. Cambridge University Press. 1993. PP. 217-25.

1894 S. Z.W. PYLYSHYN: The Role of Cognitive Architecture in Theories of Cognition. In: K. van LEHN (Ed.): *Architectures for Intelligence*. The Twenty-Second Carnegie Mellon Symposium on Cognition. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ, Hove, London. 1991. PP. 202-203.

Klassischen Symboltheorie – eine konnektionistische Architektur die Kompetenz zur Konstruktion einer kombinatorischen Syntax und Semantik von mentalen Repräsentationen besitze, auf denen dann anhand von struktursensitiven Prozessen operiert werden könne, m.a.W. sie entbehre einer kompositionalen Syntax und Semantik, wonach sich der semantische Inhalt einer komplexen Repräsentation als eine Funktion des semantischen Inhalts ihrer Konstituenten und ihrer Syntaxstruktur darstelle, woraus die Autoren den Schluß ziehen, daß eine konnektionistische Architektur nicht nur Systematizität nicht erklären könne, sondern auch nicht in der Lage sei, sie im Netzwerkverhalten wenigstens auszuführen, ohne sich auf eine Implementation einer klassischen kognitiven Architektur zu berufen:

Zunächst verstehen J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁸⁹⁵ Systematizität als eine systematische Variation im Sinne der Permutation von syntaktischen Konstituenten bzw. als eine Substitution von Konstituenten desselben syntaktischen Typs anhand eines kausalen Konstruktionsmechanismus eines komputationalen Systems i.S. A. NEWELLS – basierend auf symbolischer Logik, der sich an den geometrischen Syntaxrelationen in einem Konstituentenstrukturbaum orientiert (sog. „syntaktische Systematizität“ (engl. “syntactic systematicity”)¹⁸⁹⁶): Man kann demnach in einem konnektionistischen Netzwerk, dessen Knoten jeweils einen Begriff 'John', 'loves' und 'Mary' repräsentieren, z.B. bei der Erzeugung des Satzes 'John loves Mary', nur feststellen, welche Repräsentationen simultan aktiv sind, jedoch nicht, welche simultan aktiven Repräsentationen „miteinander in Konstruktion stehen“, da ein konnektionistischer Graph nach J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN keine Konstituentenstrukturrelationen, sondern nur Kausalrelationen bezeichnet¹⁸⁹⁷, sodaß man nicht mehr als die ungeordnete Menge von Repräsentationsvektoren {+John, +Loves, +Mary} erhalte. Desweiteren sei vor allem die syntaktische Position oder Funktion des Vektors, z.B. Subject-of, in der Menge der simultan aktiven Repräsentationsvektoren {+John, + Subject-of, +Loves, +Mary} nicht zu bestimmen, m.a.W. eine konnektionistische Architektur

1895 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 25, 26, 27: “When representations express concepts that belong to the same proposition, they are not merely simultaneously active, but also *in construction with each other*. (...)”

Thus the Representation that corresponds to the thought that John loves Fido is not a *set* of concepts but something like a *tree* of concepts, and it's the geometrical relations in this tree that mark (...) the difference between the thought that John loves Fido and the thought that Fido loves John.

(...)

There are (...) two questions that you need to answer to specify the content of a mental state: 'Which concepts are 'active'' and 'Which of the active concepts are in construction with which others?' Identifying mental states with sets of active nodes provides resources to answer the first of these questions but not the second.”

1896 Zu einer Typologie von Systematizität nach R.F. HADLEY oder nach L. NIKLASSON und T. van GELDER siehe die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. Kap. 5.5241.

1897 Siehe hierzu auch die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.411 und 5.412.

genüge nicht der Definition J.A. FODOR's und Z.W. PLYSHYN's von Systematizität, wonach jemand, der dazu fähig ist, einen Gedanken der einen prädikatenlogischen Form, z.B. aRb , nur in dem Fall zu denken, wenn er auch andere Varianten dieses Gedankens denken kann, deren Formen systematisch in Beziehung stehen (engl. "systematically related") zu dem ersteren Fall, z.B. bRa .

Dies knüpft somit an die von J.A. FODOR und Br.P. McLAUGHLIN¹⁸⁹⁸ sowie von Br.P. McLAUGHLIN¹⁸⁹⁹ verwendete Definition von Systematizität in einem weiteren Sinn an, wonach Systematizität nicht (nur) die Eigenschaft einer komputationalen (Syntax-)Architektur ist, sondern darüberhinaus einer komputationalen (Syntax-)Architektur unter einer intentionalen Interpretation (engl. "intentional interpretation") i.S.v. propositionalen Einstellungen (engl. "propositional attitudes"), d.h. Systematizität ist ein Vermögen (engl. "capacity") von intentionalen Zuständen, vor allem von propositionalen Einstellungen, deren Gedankeninhalte in notwendiger Weise mittels eines spezifischen Konstruktionsmechanismus miteinander in Beziehung gebracht werden (sog. „semantische Systematizität“ (engl. "semantic systematicity")¹⁹⁰⁰ oder „semantische Kompositionalität“ (engl. "semantic compositionality")¹⁹⁰¹). Demgemäß beschreibt Br.P. McLAUGHLIN¹⁹⁰² als systematisch diejenigen sog. „kognitiven Kompetenzen“ (engl. "cog-

1898 S. J.A. FODOR / Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work. *Cognition*. Vol. 35. 1990. PP. 184-88, v.a. PP. 187, 188: "These assumptions about the syntax and semantics of mental representations are summarized by condition C: (...) If a proposition P can be expressed in a system of mental representation M, then M contains some complex mental representation (a 'mental sentence') S, such that S express P and the (Classical) constituents of S express (or refer to) the elements of P.

(...)

The Classical explanation of systematicity assumes that C holds by nomological necessity; it expresses a *psychological law* that subsumes all systematic minds.

(...)

(...) the Classical solution to the systematicity problem entails that (i) systems of mental representation satisfy C (...) and (ii) mental processes are sensitive to the constituent structure of mental representations."

1899 S. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls. *Philosophical Studies*. Vol. 71. 1993. PP. 167-71.

1900 Zu einer Typologie von Systematizität nach R.F. HADLEY oder nach L. NIKLASSON und T. van GELDER siehe die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.5241.

1901 S. R.J. MATTHEWS: Can Connectionists Explain Systematicity? *Mind and Language*. Vol. 12. 2001. PP. 156-57 – R.J. MATTHEWS: Three-Concept Monte: Explanation, Implementation and Systematicity. *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 354-55 – J. MATTHEWS: Connectionism and Systematicity. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 688.

1902 S. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls. *Philosophical Studies*. Vol. 71. 1993. PP. 167-68: "To begin to elaborate, consider the following four pairs of capacities: (1) the capacity to think that the dog is chasing the cat and the capacity to think that the cat is chasing the dog.

(...)

Notice that the members of each pair are alike in the following ways: (I) they are capacities to have intentional states in the same intentional mode (e.g., preference, belief, seeing as), and (II) the intentional states in question have related contents.

(...)

nitive capacities")¹⁹⁰³, die jemanden befähigen, erstens, „intentionale Zustände in demselben intentionalen Modus zu haben, z.B. etwas zu glauben,“ und, zweitens, „bei den betreffenden intentionalen Zuständen in Beziehung gebrachte Gedankeninhalte zu haben“, derart, daß zwei Gedankeninhalte genau dann als systematisch, m.a.W. als „wesentlich verbunden“ (engl. “intrinsically connected”) betrachtet werden, wenn sie eine sog. „konstitutive Basis“ (engl. “constitutive basis”) besitzen, sodaß ein Sprecher mit dem Denkvermögen, einen bestimmten Gedankeninhalt zu denken, z.B. 'Der Hund jagt die Katze', mit gesetzesartiger Notwendigkeit (engl. “nomological necessity”) auch mit dem Denkvermögen ausgestattet ist, einen anderen, damit wesentlich verbundenen Gedankeninhalt zu denken, z.B. 'Die Katze jagt den Hund'. Damit stelle nach Br.P. McLAUGHLIN¹⁹⁰⁴ die Klassische Symboltheorie – im Gegensatz zum Konnektionismus – eine adäquate Kognitionstheorie dar, da sie i.S. von R. CUMMINS¹⁹⁰⁵ sog. „Funktionalanalyse“ (engl. “Functional Analysis”) Systeme

(...) a member of such a pair is, typically, 'intrinsically connected' to the other member of the pair.

(...)

(...) two capacities are systematically related if and only if they have constitutive bases such that a typical possessor of the one capacity would possess the other.”

S. auch K. AIZAWA: *The Systematicity Arguments*. Kluwer, Academic Publishers. Boston u.a. 2003. P. 99 umschreibt dies wie folgt: “(...) why is it that the capacity for some thoughts under attitude A are nomologically necessary and sufficient for other thoughts under attitude A.”

1903 Der Begriff “cognitive capacities” ist mit K. AIZAWA: *The Systematicity Arguments*. Kluwer, Academic Publishers. Boston u.a. 2003. P. 92 im Sinne von “cognitive competences” zu verstehen, weshalb er hier mit „kognitiven Kompetenzen“ übersetzt wird.

1904 S. Br.P. McLAUGHLIN: *The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls*. *Philosophical Studies*. Vol. 71. 1993. PP. 167, 169-71.

S. auch J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: *Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis*. *Cognition*. Vol. 28. 1988. P. 13, v.a. Fn. 8.

1905 Die sog. „Funktionalanalyse“ (engl. “Functional Analysis”) i.S.v. R. CUMMINS: *The Nature of Psychological Explanation*. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1983. PP. 28-51, v.a. PP. 28-30 und R. CUMMINS: *Functional Analysis*. *Journal of Philosophy*. Vol. 72. 1975. PP. 741-64, v.a. PP. 762-63 beschäftigt sich – in Analogie zur Systemanalyse in der Physik, der Elektrotechnik und der Physiologie in der Biologie – mit der Analyse von kognitiven Systemen in deren Komponenten und Funktionen bzw. Dispositionen im Rahmen von sog. „(Zustand-)Übergangstheorien“ (engl. “transition theories”) und sog. „Eigenschaftstheorien“ (engl. “property theories”). Entscheidend ist dabei, daß die Analyse einer komplexen Funktion bzw. Disposition eines kognitiven Systems derart vorgenommen wird, daß das System in eine Anzahl von immer kleineren diskreten Systemkomponenten mit den entsprechenden Subdispositionen analysiert wird, sodaß schließlich die zu analysierende (Gesamt-)Funktion anhand von recht einfachen elementaren und diskreten (Computer-)Programminstruktionen, z.B. in Form von Zustandsübergängen im Rahmen eines Flußdiagramms, dargestellt werden kann, wie sie in der klassischen Künstlichen Intelligenz verwendet worden waren.

Den Begriff der „Funktionalanalyse“ umschreibt R. CUMMINS selbst wie folgt: *The Nature of Psychological Explanation*. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1983. PP. 28, 31: “Functional analysis consists in analyzing a disposition into a number of less problematic dispositions such that programmed manifestation of these analyzing dispositions amounts to a manifestation of the analyzed disposition. By 'programmed' here, I simply mean organized in a way that could be specified in a program or flow-chart.”

S. hierzu auch T. HORGAN / J. TIENSON: *Connectionism and the Philosophy of Psychology*. MIT Press. 1996. PP. 140-41, die – entgegen R. CUMMINS – zu analysierende Dispositionen im Rahmen von Funktionalanalysen eher als kausale Tendenzen (engl. “causal tendencies”) betrachten, die

matizität wirklich erkläre, indem sie angebe, worin der Besitz dieses Denkvermögens eigentlich bestehe (engl. "consist in"), u.z. in einem System von klassischen (Syntax-)Algorithmen, die mit nomologischem Status¹⁹⁰⁶ versehene Symboltransformationen auf der Basis einer Konstituentenstruktur mit komplexen Symbolen ausführen, unter Einhaltung des Kriteriums der sog. „semantischen Kohärenz“ (engl. "semantic coherence")¹⁹⁰⁷, und damit ein System von mentalen Repräsentationen im Sinne der sog. „Repräsentationalen Theorie des Geistes“ (engl. "Representational Theory of Mind (RThM)") J.A. FODOR's¹⁹⁰⁸ erzeugen, die als intentionale Zustände, insbesondere als propositionale Einstellungen, interpretiert werden können.

Desweiteren kritisieren J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN¹⁹⁰⁹, daß die konnektionistischen Modelle auch darin versagen, Produktivität mit Hilfe von rekursiven Strukturen ohne eine Implementation einer Klassischen Symbolarchitektur zu erzeugen, da eben das dafür notwendige Symbolsystem mit einer syntaktischen Konstituentenstruktur zur Produktion von komplexen Symbolstrukturen fehle.¹⁹¹⁰

M.E. scheint mit Th. GOSCHKE und D. KOPPELBERG¹⁹¹¹ das Fallbeispiel¹⁹¹² P. SMOLENSKY's insofern überzeugend zu zeigen, daß, mit der rekursiven Konstruktion der Basisvektoren, die syntaktische Position der Konstituentenvektoren mathematisch exakt die syntaktische Funktion der Symbolkonstituenten, hier des Relators 'L' und der Individuenvariablen 'S' und 'K', wiedergeben, sodaß die Vektoren nicht nur – entgegen der Position J.A. FODOR's und Z.W. PYLYSHYN's – simultan aktiv sind, sondern auch derart „in Konstruktion miteinander stehen“, daß eine geordnete (Syntax-)Struktur erzeugt wird, die gewährleistet, daß auch diverse Kombinationsvarianten aus Füller- und Rollenvektoren „produziert“ und voneinander unterschieden werden können, z.B. der Kompositumsvektor

$$\mathbf{p} = \mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{L} + \mathbf{r}_1 \otimes [\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{S} + \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{K}], \quad (196)$$

der die prädikatenlogische Formel 'L(K, S)' bzw. die Aussage 'Kim loves Sandy' repräsentiert, da sich in diesem Fallbeispiel entsprechend andere Tensorproduktvektoren ergeben, hier $\mathbf{r}_0 \otimes \mathbf{S}$ und $\mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{K}$. Mit dieser flexiblen und dynamischen Kombination von Konstituentenvektoren in der Tensorprodukt-Re-

nicht die Form von programmierbaren Regeln besitzen müssen.

1906 Siehe hierzu das Zitat in Fn. 1898.

1907 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.143.

S. auch Chr. ELIASMITH / W. BECHTEL: Symbolic versus Subsymbolic. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 292.

1908 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.145.

1909 S. J.A. FODOR / Z.W. PYLYSHYN: Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis. Cognition. Vol. 28. 1988. PP. 33, 35-36.

1910 Die Diskussion um die Problematik des Produktivitätsarguments spielt in der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte nur eine untergeordnete Rolle.

1911 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 77-78, 79.

1912 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.214.

präsentationstechnik P. SMOLENSKY's dürfte m.E. mit Chr. ELIASMITH und W. BECHTEL¹⁹¹³ zumindest die von J.A. FODOR, Z.W. PYLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN geforderte klassische Konstituentenstruktur, und damit die Eigenschaft der syntaktischen Systematizität und der Produktivität¹⁹¹⁴ im Prinzip zumindest in Form einer vektoriellen Konstruktion repräsentiert werden können, was Br.P. McLAUGHLIN in einem späteren Artikel, zumindest in Bezug auf die syntaktische Systematizität, einzuräumen bereit ist¹⁹¹⁵, wohingegen, was die Erklärung der syntaktischen Systematizität und die semantische Systematizität i.S.d. semantischen Kompositionalität betrifft, hätte P. SMOLENSKY darzulegen, daß die Kodierung des semantischen Aspekts der Symbolkonstituenten in Form der – in der Regel – völlig verteilten Repräsentation der Füllervektoren den diesbezüglichen Anforderungen der Klassischen Symboltheorie genügt, was jedoch im Rahmen der Diskussion um die Systematizitäts- und Kompositionalitätsthematik sehr umstritten ist.¹⁹¹⁶

Einen bereits kurz angedeuteten gewichtigen Einwand bringen nun J.A. FODOR und Br.P. McLAUGHLIN¹⁹¹⁷ in Verbindung mit Br.P. McLAUGHLIN¹⁹¹⁸ vor, in-

-
- 1913 S. Chr. ELIASMITH / W. BECHTEL: Symbolic versus Subsymbolic. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 293.
- 1914 Zur Rekursivität bzw. zu komplexen rekursiven Strukturen im Tensorprodukt-Repräsentationsschema s. z.B. P. SMOLENSKY: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 200-208.
- 1915 Dieses Zugeständnis Br.P. McLAUGHLIN's geschieht allerdings nur unter dem Vorbehalt seiner These vom sog. „Implementations-Konnektionismus“ (engl. "implementational connectionism"). Siehe hierzu die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.722.
- 1916 Eingehend hierzu s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.3-5.7.
- 1917 S. J.A. FODOR / Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work. Cognition. Vol. 35. 1990. PP. 186-88, v.a. P. 186: "We there stipulate that, for a pair of expression types E1, E2, the first is a *Classical* constituent of the second *only if* the first is tokened whenever the second is tokened. (...) (specifically, every token of the latter *contains* a token of the former (...))."
- S. auch J.A. FODOR / Br.P. McLAUGHLIN: Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work. Cognition. Vol. 35. 1990. PP. 196-203, v.a. PP. 197, 198, 199, 200, 201: „The only pattern of activity that will be actually tokened (...) is the superposition vector (...).
(...)
(...) It is worth emphasizing (...) that there is, in general, no *unique* decomposition of a tensor product or superposition vector into components.
(...)
(...) the components of a complex vector are typically not even tokened when the complex vector itself is tokened (...).
(...) the constituents of complex activity vectors typically aren't 'there', so if the causal consequences of tokening a complex vector are sensitive to its constituent structure, that's a miracle.
(...)
What are causally efficacious according to connectionists are the activation values of individuals units (...)."
- 1918 S. Br.P. McLAUGHLIN: The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls. Philosophical Studies. Vol. 71. 1993. PP. 167-71, 178-80: "In connectionists architectures constituent representations will not be causally efficacious."

dem sie betonen, daß in einem Symbolsystem das Vorkommen bzw. Vorkommen (engl. "token", "tokening") einer komplexen Symbolstruktur notwendig mit dem raum-zeitlichen Vorkommen der darin enthaltenen klassischen Konstituenten verbunden sei, z.B. jedes Auftreten des zusammengesetzten Ausdrucks 'John loves Mary' impliziere mit Notwendigkeit das Auftreten des Ausdrucks 'John' als Konstituente im Sinne einer Teil/Ganzes-Beziehung¹⁹¹⁹, wodurch diese Konstituente erst ihre kausale Wirkung (engl. "causal consequence") in Bezug auf die Konstituentenstruktur des Gesamtausdrucks beisteuern könne, wohingegen die Konstituentenvektoren, die die Konstituenten in einer komplexen Symbolstruktur kodieren, in einer Tensorprodukt-Repräsentation eben nicht unbedingt selbst als ein tatsächlich vorhandener (Bestand-)Teil des komplexeren Kompositumvektors aufzutreten brauchen, m.a.W. ein auf Subsymbolen basierender Konstituentenvektor, was P. SMOLENSKY¹⁹²⁰ selbst einräumt, sei keine reale und lokale Vektorstruktur, die eine kausale Wirkung erziele, da sie sich durch die ständige Musterüberlagerung im Laufe des vektoriellen Komputationsprozesses in den komplexeren Vektorkonstruktionen „auflöse“ und nicht mehr aus ihnen zurückgerechnet werden könne.¹⁹²¹ Deshalb können nach J.A. FODOR und Br.P. McLAUGHLIN auch keine struktursensitiven Prozeßoperationen definiert werden, die kausal sensitiv (engl. "causal sensitive") in Bezug auf die formalen Struktureigenschaften der Konstituentenvektoren und ihrer komplexen Vektorkonstruktionen seien, was jedoch eine entscheidende Bedingung dafür darstelle, um Systematizität zu erklären. Weiterhin könne nach Br.P. McLAUGHLIN auch keine semantische Interpretation eines Kompositumvektors vorgenommen werden, derart, daß i.S.v. R. CUMMINS' sog. „Funktionalanalyse“ (engl. "Functional Analysis")¹⁹²² die Gesamtbedeutung eines komplexen Kompositumvektors als eine Funktion des semantischen Gehalts seiner Konstituentenvektoren und der syntaktischen Struktur seiner subsymbolischen Konstituentenvektoren „errechnet“ werden könne, was jedoch eine entscheidende Bedingung darstelle, um das Problem der semantischen Kompositionalität zu erklären. Zusammenfassend kann festgestellt werden¹⁹²³, daß die sog. "Integrated Con-

1919 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.414.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.412.

1920 S. P. SMOLENSKY: Connectionism, Constituency, and the Language of Thought. In: B. LOEWER / G. REY (Eds.): Meaning in Mind. Fodor and his Critics. Blackwell. Cambridge/MA, Oxford/UK.

1991. P. 222: "Are the vector constituents in connectionist systems causally efficacious? It would appear not (...).

(...)

It is the numerical values comprising the vector (in the connectionist case, the individual activity values) that really drive the machine.

As Fodor and Pylyshyn will, I believe, agree, caution in treating 'causal efficacy' is required even for the Classical case."

1921 Nach P. SMOLENSKY: A Method for Connectionist Variable Binding. In: Technical Report CU-CS-356-87. University of Colorado. Department of Computer Science. Boulder. 1987. PP. 1-10 können jedoch die Konstituentenvektoren – unter gewissen Voraussetzungen – aus dem kompositionalen Tensorproduktvektor zurückgerechnet werden.

1922 Siehe hierzu die Ausführungen in Fn. 1905.

1923 Siehe hierzu im einzelnen die Ausführungen in Kap. 5.1.01.33, 5.1.01.4.

nectionist / Symbolic (ICS) Cognitive Architecture" P. SMOLENSKY's¹⁹²⁴ eine alternative subsymbolische (Mikro-)Theorie der (Neuro-)Kognition darstellt, wobei es sich jedoch m.E. nur insoweit uneingeschränkt um einen sog. „Implementationskonnektionismus“ (engl. "implementational connectionism") i.S.v. Br.P. McLAUGHLIN¹⁹²⁵ handelt, wenn man voraussetzt, daß eine ultralokale Repräsentationsform¹⁹²⁶ benutzt wird, da man in diesem Fall eine klassische Konstituentenstrukturarchitektur i.S.v. J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN konstruiert hätte, wohingegen man aber im Fall einer, von P. SMOLENSKY in der Regel benutzten, völlig verteilten Repräsentationsform eine subsymbolische Systematizität, Kompositionalität und Produktivität eigenen (Konstituentenstruktur-)Typs besitzt, so daß mittels einer homomorphen Transformationsfunktion eine diskrete Symbolstruktur auf einen kontinuierlichen konnektionistischen Aktivierungsvektor abgebildet wird.

6.423 Um der Kritik an der mathematischen Konstruktion der sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. "tensor product representation") P. SMOLENSKY's entgegenzutreten¹⁹²⁷, daß die Anzahl der erforderlichen (Bindungs-)Neuronen polynomial mit der Informationsverarbeitungstiefe der rekursiven Struktur des betreffenden komplexen Aktivierungsvektors zunehmen würde, besitzt die auf der Zirkularkonvolutionsoperation beruhende sog. "Holographic Reduced Representations (HRRs)" T. PLATE's¹⁹²⁸ dagegen den Vorzug, daß die Länge bzw. die Dimension des resultierenden Aktivierungsvektors auch bei der Anwendung auf komplexe, d.h. rekursive, kompositionale (Symbol-)Strukturen konstant bleibt, sodaß die Variablenbindung des Füllervektors mit dem entsprechenden Rollenvektor zu einem Bindungsvektor mit derselben Anzahl von Vektorelementen bzw. Vektorkomponenten führt, und ebenfalls anhand der synchronen Aktivität der betreffenden Neuronenpopulationen realisiert werden kann.

Desweiteren führt eine verbesserte Rückberechenbarkeit eines komplexen, kompositionalen Aktivierungsvektors¹⁹²⁹ im Vergleich zu der Tensorprodukt-Repräsentation P. SMOLENSKY's dazu, daß dem Einwand J.A. FODOR's und Br.P. McLAUGHLIN's¹⁹³⁰ in Bezug auf die sich auflösenden Konstituentenvektoren und die sich daraus ergebende fehlende kausale Sensitivität der Prozeßoperationen begegnet werden kann, was jedoch Fr. van der VELDE und M. de KAMPS¹⁹³¹ – m.E. nicht überzeugend – zu widerlegen versuchen, die argumentieren, daß

1924 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.

1925 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.01.30.

1926 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.22.

1927 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.1, 6.422.

1928 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.

1929 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.2.

1930 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

1931 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 98-99: "The constituents of a combinatorial structure have to be recognizable within the structure itself. This is where reduced vector coding fails. As a result of the reduced representation, the constituents are no longer recognizable within the combinatorial structure. Instead, they are encapsulated within the combinatorial structure. Because the n-dimensional vector of a familiar constituent is not recognizable within the n-dimensional vector of a novel combinatorial structure, it cannot be used to guide the process of answering binding questions (...)."

der Konstituentenvektor einer neuen kombinatorischen Struktur im Rahmen der HRRs-Architektur sowie bei anderen VSA- und CBMMs-Modellen¹⁹³² trotz ihrer Rückrechenbarkeit im Rahmen eines Dekodierungsprozesses nicht identifizierbar sei.

6.424 In der konnektionistischen Literatur¹⁹³³ wird ferner kritisiert, z.B. vor allem von R.F. HADLEY¹⁹³⁴, daß J.A. FODOR's und Z.W. PYLYSHYN's Konzeption von Systematizität keinen Bezug zu lernbasierten Generalisierungsprozessen herstellen würde, weshalb man versucht hat, eine hierarchische Typologie zu erstellen, um Grade von lernbasierter Systematizität, syntaktischer und semantischer Kompositionalität bei konnektionistischen (Architektur-)Modellen bestimmen zu können:

In Anlehnung an die Systematizitätstypologie von R.F. HADLEY¹⁹³⁵, der m.E. der Vorzug zu geben ist gegenüber der Typologie von L. NIKLASSON und T. van GELDER¹⁹³⁶, kann man nun vier grundlegende Grade von Systematizität unterscheiden, u.z. (1) "weak systematicity", (2) "quasi-systematicity", (3) "strong sys-

1932 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.11.

1933 Einen Überblick bietet R.F. HADLEY: *Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks*. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1152-56.

1934 S. R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: *Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning*. *Minds and Machines*. Vol. 7. 1997. PP. 3, 4 – R.F. HADLEY: *Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks*. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1152.

1935 S. z.B. R.F. HADLEY: *Compositionality and Systematicity in Connectionist Language Learning*. In: *Proceedings of the 14th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1992. PP. 659-61 – R.F. HADLEY: *Systematicity in Connectionist Language Learning*. *Mind and Language*. Vol. 9. No. 3. 1994. PP. 250-51 – R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: *Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning*. *Minds and Machines*. Vol. 7. 1997. PP. 2-3. Eine Einführung hierzu bietet R.F. HADLEY: *Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks*. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1153, der seine Typologie – unter Auslassung des zweiten Kriteriums – wie folgt zusammenfaßt: "A cognitive agent, or a connectionist network, might exhibit any of the following degrees of systematicity (...). In the following, *novel* is measured relative to a known training corpus.

1. Weak systematicity. An agent is at most weakly systematic if, after training, it can process 'test' sentences (or symbol sequences) containing novel combinations of words (symbols) but cannot process sentences containing familiar words in positions that are novel for those words.

2. Strong systematicity requires that an agent *learn* to generalize the use of a significant fraction of its vocabulary to novel syntactic positions, in both simple and embedded sentences. In this context, a word or symbol is considered to occupy a novel position (...) only if the agent has not encountered that word in that syntactic position at any level of sentential embedding. (...)

3. Strong semantic systematicity (...) is displayed when agents not only manifest strong systematicity (...), but they are also able to assign appropriate meanings to all words occurring in novel test sentences that could be used to establish a mastery of level 2.

(It is here intended that when an agent assigns an appropriate meaning to a word, the agent can at least map the word onto an internal conceptual representation.)"

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.1.07.

1936 S. T. van GELDER / L. NIKLASSON: *On being Systematically Connectionist*. *Mind and Language*. Vol. 9. No. 3. 1994. P. 291 – L. NIKLASSON / T. van GELDER: *Can Connectionist Models Exhibit Non-Classical Structure Sensitivity?* In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. P. 665.

tematicity" und (4) "strong semantic systematicity", wobei das entscheidende dritte Kriterium wie folgt definiert wird, nämlich, daß ein konnektionistisches System dann als sog. „streng systematisch“ (engl. "strongly systematic") beschrieben werden kann, falls die neu gelernten Sätze nicht nur eine neue Kombination von Symbolen enthalten, sondern ein Symbol eine neue syntaktische Position in einem einfachen oder eingebetteten neuen Satz einnimmt, in der es in den Trainingsdaten noch nicht aufgetreten ist, und das System es gelernt hat, dies in Bezug auf einen signifikanten Bruchteil (engl. "significant fraction") des Vokabulars zu generalisieren. Das vierte Kriterium erfordert zudem, daß dies auch für den Fall der Hinzuziehung der Symbolsemantik geschieht, d.h. der Zuweisung von angemessenen Bedeutungen zu allen Worten in einem neuen Satz.

Seit den achtziger Jahren des 20. Jdht.'s sind nun eine Vielzahl von konnektionistischen Modellen entworfen worden, die den Anspruch erheben, dem Kriterium der starken Systematizität i.S. R.F. HADLEY's zu genügen, z.B. das sog. "Recursive Auto-Associative Memory (RAAM)" von J. POLLACK¹⁹³⁷ und die darauf basierenden Modelle von D. CHALMERS¹⁹³⁸ sowie von L.F. NIKLASSON und M.BODÉN¹⁹³⁹, oder das sog. "Simple Recurrent Network (SRN)" nach J.L. ELMAN¹⁹⁴⁰, wobei dagegen jedoch begründete Zweifel erhoben worden sind, insbesondere von R.F. HADLEY¹⁹⁴¹ selbst, der auch P. SMOLENSKY's Tensorprodukt-Schema nur den ersten Systematizitätsgrad zugesteht, da dieser nicht hinreichend begründen kann, wie seine „fest verdrahtete“ (engl. "hard-wired") Konstruktion über (Lern-)Prozesse zu ihren Repräsentationen gelangen soll, m.a.W. wie sich die Verbindungsgewichte der (Bindungs-)Vektoren im Rahmen eines Lernverfahrens angemessen einstellen sollen. Daher haben R.F. HADLEY und M.B. HAYWARD¹⁹⁴² im Jahr 1997 selbst ein Modell, das sog. "(Combinatorial Endowed) Hebbian-Competitive Network"¹⁹⁴³, entwickelt, das sogar den vierten Grad an Systematizität i.S. der "strong semantic systematicity" erreicht, indem sie allerdings Bindungsvektoren verwendet haben, die in ihrer Bindungsstruktur in Form von Füller/Rolle-Bindungen angelehnt sind an diejenigen in P. SMOLENSKY's Tensorproduktoperation, jedoch, anstatt von reinen dynamischen, temporalen (Synchronisations-)Mechanismen auszugehen, zusätzlich noch sog. „konjunktive Bindungsknoten“ (engl. "Conjunctive Binding Nodes (CBN)") postulie-

1937 S. z.B. J.B. POLLACK: Recursive Distributed Representations. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 77- 105.

1938 S. z.B. D.J. CHALMERS: Syntactic Transformations on Distributed Representations. Connection Science. Vol. 2. 1990. PP. 53-62.

1939 S. z.B. L. NIKLASSON / M. BODÉN: On Representing Structure and Structured Representations in Connectionist Networks. In: A. BROWNE (Ed.): Current Perspectives in Neural Computing. Institute of Physics. Bristol. 1997. PP. 20-50 – M. BODÉN / L. NIKLASSON: Semantic Systematicity and Context in Connectionist Networks. Connection Science. Vol. 12. 2000. PP. 111-42.

1940 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.25.02.

1941 S. z.B. R.F. HADLEY: Systematicity in Connectionist Language Learning. Mind and Language. Vol. 9. 1994. PP. 247-72, v.a. PP. 254-69.

1942 S. R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning. Minds and Machines. Vol. 7. 1997. PP. 1-37, v.a. PP. 6-25.

1943 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.07.

ren.¹⁹⁴⁴

Der Kritik J.A. FODOR's und Br.P. McLAUGHLIN's¹⁹⁴⁵ an der Tensorprodukt-Repräsentation ist nun m.E. mit J. PETITOT¹⁹⁴⁶ und R.F. HADLEY¹⁹⁴⁷ insoweit zuzustimmen, daß zwar P. SMOLENSKY aufzeigt, wie eine strukturelle Rolle anhand eines Rollenvektors im Tensorprodukt mit einer Position in der Konfiguration eines symbolischen Parserstrukturbaumes identifiziert werden kann, aber nur unter der (Voraus-)Annahme, daß die betreffenden (Konstituenten-)Strukturrelationen bereits bestehen, wohingegen er aufzuzeigen hätte, wie im Rahmen eines Lernvorgangs eines künstlichen neuronalen Netzwerks diese syntaktischen (Positions-)Relationen überhaupt erst anhand von Rollenvektoren eigenständig instantiiert werden, m.a.W., in Entsprechung zum Netzwerk R.F. HADLEY's und M.B. HAYWARD's¹⁹⁴⁸, hätte man zu zeigen, wie die Füller- und Rollenvektoren überhaupt erst einmal über die Anpassungs- und Verallgemeinerungsleistung eines Netzwerks angemessen verwendet werden, z.B. in Form des Systematizitätsgrades "strong semantic systematicity" i.S. R.F. HADLEY's¹⁹⁴⁹, ohne, wie P. SMOLENSKY, eine symbolische Definition der syntaktischen Rollen vorauszusetzen, von denen er dann seine Rollenvektoren homomorph abbildet, sodaß er, insofern m.E. mit seiner Tensorprodukt-Repräsentation „nur“ eine abstrakte mathematische Konstruktion entwirft, die, im Sinne eines sog. „Implementationskonnektionismus“ (engl. "implementational connectionism") Br.P. McLAUGHLIN's¹⁹⁵⁰, eine beliebige Symbol(-konstituenten-)struktur in eine Vektor- und Tensorstruktur transformiert.

6.425 Wie bereits erwähnt¹⁹⁵¹, hat dies jedoch P. SMOLENSKY, m.E. zumindest im Ansatz, versucht aufzuzeigen, z.B. mit seinem sog. "Tensor Product Production System (TPPS)", und das Variablenbindungsproblem über einen temporalen integrativen (Synchronisations-)Mechanismus in Form des Tensorprodukts – mit den bereits dargelegten Einschränkungen – überzeugend gelöst werden kann, wobei er bei der Variablen/Argument-Bindung i.S. der Rolle/Füller-Bindungen das Repräsentationsschema basierend auf der temporalen Synchronizität

1944 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.07.2.

1945 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

S. auch H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.722.

1946 S. z.B. J. PETITOT: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. Sémiotiques. Vol. 6.

1994. PP. 216-20, v.a. PP. 217, 218: "(...) the main problem is that of the configurational definition of roles which can substitute for the classical role labels. In such a configurational definition, roles are identified with positions – places – in configurations of positions. Of course, they have to be filled by fillers, but the key difficulty is to elaborate an effective CN [connectionist] theory of such positional relations *without taking for granted any prior CL [classical] representation of them.*"

1947 Zur Kritik R.F. HADLEY's und deren Einschränkung siehe hierzu auch die Ausführungen in H. Maurer: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. 2006, 2009. Kap. 5.5241, 5.531.

1948 Siehe hierzu auch die Ausführungen in H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009. Kap. 5.5241.

1949 S. Fn. 1935.

1950 S. Fn. 1915, 1925.

1951 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

(engl. "temporal synchrony representational scheme")¹⁹⁵² i.S. von L. SHASTRI und V. AJJANAGADDE¹⁹⁵³ aufgreift, das allerdings selbst insofern einen geringeren Grad an neurobiologischer Plausibilität aufweist, da es im Rahmen eines sog. „strukturierten Konnektionismus“ (engl. "structured connectionism")¹⁹⁵⁴ nicht mit dem Repräsentationstyp "fully distributed" (dt. „völlig verteilt“)¹⁹⁵⁵ arbeitet, sondern die mentalen Objekte, wie z.B. Konzepte, Individuen und Attribute, als strukturierte Repräsentationen lokal¹⁹⁵⁶ und diskret repräsentiert werden.

Der Einwand Fr. van der VELDE's und M. de KAMPS¹⁹⁵⁷, daß der (Bindungs-)Mechanismus über die Synchronisation der neuronalen Aktivität am Produktivitätskriterium scheitert, ist hingegen zurückzuweisen, da sie, was L. SHASTRI¹⁹⁵⁸ zu Recht betont, irrig annehmen, daß z.B. in der SHRUTI-Architektur für alle möglichen Variable/Argument-Bindungsfakten vorimplementierte Faktneuronen (engl. "fact nodes") erforderlich seien.

6.426 Den Einwand eines geringen Grades an neurobiologischer Plausibilität kann man auch dem ebenfalls im Rahmen des sog. „symbolischen Konnektionismus“ (engl. "symbolic connectionism")¹⁹⁵⁹ aus gemischt distribuierten und lokalen Repräsentationen konstruierten sog. "Learning and Inference with Schemas and Analogies (LISA) Model" J.E. HUMMEL's und K.J. HOLYOAK's¹⁹⁶⁰ entgegenhalten, das zwar einen (Phasen-)Synchronizitäts-Bindungsmechanismus für das Variablenbindungsproblem verwendet, wogegen aber T.C. STEWART und Chr. ELIASMITH¹⁹⁶¹ zu Recht einwenden, daß sich dabei die Synchronisationsaktivität als ein Ergebnis der Konstruktion der Subpropositionsneuronen (engl. "(driver) subpropositions units") darstellt, die aufgrund von festgesetzten, erregenden Eingabemustern (synchron) oszillieren, und eben nicht – umgekehrt – sich die funktionelle Variablenbindung erst als ein Ergebnis der synchronen Aktivität

1952 S. B.B. TESAR / P. SMOLENSKY: Synchronous Firing Variable Binding is a Tensor Product Representation with Temporal Role Vectors. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 871-74, v.a. P. 873.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

1953 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.05.1.

1954 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.210, 5.1.05.

1955 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.4.

1956 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.2.

1957 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 41.

S. auch Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 94.

1958 S. L. SHASTRI: Comparing the Neural Blackboard and the Temporal Synchrony-Based SHRUTI Architectures. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 84: "Contrary to their claim, SHRUTI does not require prewired fact nodes for all possible facts. SHRUTI requires fact nodes (actually, fact circuits) only for encoding memorable facts in its long-term memory."

1959 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.04.1.

1960 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.04.1.

1961 S. im einzelnen T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 599-602.

eines Neuronenverbandes einstellt, analog zu einem neurobiologisch plausiblen Neuronenmodell.¹⁹⁶² Ferner kritisieren sie, daß die Anzahl der benötigten Neuronen zur Modellierung einer komplexen natürlichen Sprache in der LISA-Architektur viel zu hoch wäre.¹⁹⁶³

M.E. zu Recht haben nun J.E. HUMMEL und K.J. HOLYOAK¹⁹⁶⁴ darauf hingewiesen, daß das Kriterium der semantischen Kompositionalität für eine konnektionistische (Neuro-)Architektur nur dann erfüllt werde, falls sie sich dadurch auszeichnet, daß sie den traditionellen (statischen) (Bindungs-)Mechanismus der sog. „konjunktiven Kodierung“ (engl. “conjunctive coding”)¹⁹⁶⁵ im Konnektionismus vermeidet, wonach im Rahmen der sog. „Füller/Rolle-Bindung“ (engl. “filler/role binding”) die sog. „Füller/Rolle-Unabhängigkeit“ (engl. “filler-role independence”) verletzt werden würde, d.h., daß die Repräsentation eines (Bindungs-)Elements, z.B. eines Füllers (einer Rolle), variiert in Abhängigkeit davon, an welches entsprechende (Bindungs-)Element, z.B. an eine bestimmte Rolle (an einen bestimmten Füller), es gebunden wird, sodaß im Beispiel der Aussagen 'Sandy loves Kim' und 'Kim loves Sandy' das Konzept 'Sandy', indem es, abhängig davon, ob es an die Agenten- oder die Rezipienten-Rolle gebunden wird, im Rahmen des konjunktiven Kodierungsmechanismus anhand von völlig verschiedenen Mengen an Neuronen repräsentiert wird, da keine echte Über-

1962 S. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. P. 601: “However, the kind of synchronization used in LISA is not like that being argued for in biological brains. In LISA, synchronization occurs because there are inhibitory populations connected to each subproposition which set up an oscillatory behavior when the proposition they are connected to is given a constant input. That oscillation is then reflected in all units that are excitatorily connected to these subpropositions (i.e. propositions and objects/relations). Usually, synchronization in the neurobiological literature is considered functional only if it is not explainable by common input. In LISA binding is established first by construction of subproposition units and that binding then results in synchronization. In the neurobiological literature, synchronization is supposed to *result* in binding (...). Consequently, the neural plausibility of LISA is not supported by current work on synchronization.”

S. hierzu J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. Psychological Review. Vol. 110. 2003. PP. 224-34, v.a. P. 230 und PP. 252-54, v.a. P. 254, die die eingeschränkte Plausibilität ihres inhibitorischen Algorithmus des Subpropositionsneurons eingestehen, der an das überzeugendere Modell eines gekoppelten Oszillators i.S.v. D. WANG / J. BUHMANN / Chr. von der MALSBURG: Pattern Segmentation in Associative Memory. Neural Computation. Vol. 2. 1990. PP. 94-106 angelehnt ist.

1963 S. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford Univ. Press. Oxford. 2012. PP. 600-601.

1964 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITTUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31-34.

1965 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITTUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31-34, v.a. P. 2.

Ein Beispiel für einen sog. „konjunktiven Kodierungsmechanismus“ bietet z.B. das Modell von G.E. HINTON in G.E. HINTON: Mapping Part-Whole Hierarchies into Connectionist Networks. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 47-76.

lagerung von jeweils aktivierten Neuronen, die das Konzept 'Sandy' jeweils in der relationalen Rolle als Agent bzw. als Rezipient implementieren, stattfinden kann. Demgegenüber zeichnet sich ein dynamischer (Bindungs-)Mechanismus (engl. "dynamic binding") nach J.E. HUMMEL und K.J. HOLYOAK¹⁹⁶⁶ gerade dadurch aus, daß ein bestimmtes (Füller-)Objekt bzw. eine bestimmte relationale Rolle anhand derselben Neuronenpopulation repräsentiert wird, unabhängig davon, an welches entsprechende (Bindungs-)Element, z.B. an eine bestimmte Rolle bzw. an einen bestimmten Füller, es gebunden wird, sodaß es dieser dynamische (Bindungs-)Mechanismus im Beispiel der Aussagen 'Sandy loves Kim' und 'Kim loves Sandy' erlaubt, daß die beiden relationalen Konfigurationen anhand desselben Mengenverbandes kodiert werden, und nur die entgegengesetzten neuronalen Synchronizitätsrelationen entsprechend variiert werden müssen, was jedoch nach J.E. HUMMEL und K.J. HOLYOAK¹⁹⁶⁷ für die sog. "Tensor Product Representation (TPR)" P. SMOLENSKY's und die sog. "Holographic Reduced Representations (HRRs)" T. PLATE's nicht der Fall sein soll.

Demgegenüber wenden, m.E. zu Recht, Fr. van der VELDE und M. de KAMPS¹⁹⁶⁸ ein, daß aber gerade in der LISA-Architektur selbst ein (Bindungs-)Mechanismus verwendet wird, der zwar dynamisch arbeitet, jedoch mit Hilfe von feststehenden konjunktiven Kodierungsneuronen in Form von Subpropositionsneuronen, sodaß sich die Frage stellt, wie beim Erlernen von neuen Propositionen bisher nicht vorhandene Konjunktionsneuronen eingebunden werden sollen, sodaß systematische Inferenzen ausgeführt werden können.

6.427 Der Einwand eines geringeren Grades an neurobiologischer Plausibilität wird nun von L. SHASTRI¹⁹⁶⁹, R.F. HADLEY¹⁹⁷⁰ und – wie bei der LISA-Architektur J.E. HUMMEL's und K.J. HOLYOAK's – wiederum von T.C. STEWART und Chr. ELIASMITH¹⁹⁷¹ auch gegen die sog. "Neural Blackboard Architectures (NBAs)" Fr. van

-
- 1966 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31–34, v.a. P. 3.
- 1967 S. J.E. HUMMEL / K.J. HOLYOAK / C. GREEN / L.A.A. DOUMAS / D. DEVNICH / A. KITUR / D.J. KALLAR: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): Compositional Connectionism in Cognitive Science. Papers from the AAAI Fall Symposium. AAAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31–34, v.a. PP. 2-3.
- 1968 S. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 95-96 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. Brain and Mind. Vol. 3. 2002. PP. 304-305.
- 1969 S. L. SHASTRI: Comparing the Neural Blackboard and the Temporal Synchrony-Based SHRUTI Architectures. Commentary on: Fr. van der Velde / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 85-86.
- 1970 S. R.F. HADLEY: Neural Circuits, Matrices, and Conjunctive Binding. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 80.
- 1971 S. im einzelnen T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 602-604.

der VELDE's und M. de KAMPS¹⁹⁷² vorgebracht, u.z. erstens was die überhöhte Anzahl der benötigten (Bindungs-)Neuronen betrifft, zweitens, daß die angenommene sehr hohe und weitreichende Konnektivität zwischen z.B. allen sog. "NP main assemblies" und allen sog. "VP main assemblies" anhand von experimentell-empirischen Belegen in den kognitiven Neurowissenschaften nicht bestätigt wird, und drittens, die ziemlich willkürliche Beschränkung der von vornherein festgelegten Anzahl von z.B. den "NP main assemblies", den "VP main assemblies", den "adjective main assemblies", den "preposition main assemblies" usw., die – bei einer zu niedrig angesetzten Anzahl – die Zahl der verarbeitungsfähigen Elemente im Rahmen einer (Sprach-)Struktur zu sehr beschränken würde, und – bei einer zu hoch angesetzten Anzahl – wiederum die zur Verfügung stehende Kapazität der kortikalen Sprachareale an Neuronen übersteigen würde.

Desweiteren kritisieren, m.E. zu Recht, L.A.A. DOUMAS, K.J. HOLYOAK und J.E. HUMMEL¹⁹⁷³, daß ein bloß assoziativer Bindungsmechanismus über die sog. "structure (sub)assemblies" im Rahmen der sog. "gating circuits" nicht hinreichend sei, um eine explizite kompositionale Repräsentation der Bindung zwischen einer Relation und ihren Argumenten vorzunehmen, was ja gerade ein temporaler (Synchronisations-)Mechanismus gewährleisten würde, den Fr. van der VELDE und M. de KAMPS¹⁹⁷⁴ jedoch dafür als ungeeignet betrachten. Demgegenüber bevorzugen sie eine Konnektionsstruktur in ihren "gating circuits", deren Funktionalität eher den sog. "Conjunctive Binding Nodes (CBN)" i.S. R.F. HADLEY's¹⁹⁷⁵ gleicht, indem diese eine logische UND-Operation instantiieren.¹⁹⁷⁶ Schließlich sieht sich – wie R.W. GAYLER¹⁹⁷⁷ bemerkt – das von Fr. van der VELDE und M. de KAMPS verwendete lokale Repräsentationsformat¹⁹⁷⁸ dem grundsätzlichen Einwand ausgesetzt, daß solch ein System um neue Neuronen ergänzt werden müßte, sobald es neue Eingabemuster zu lernen hätte, und nicht – wie

1972 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.09.2.

1973 S. L.A.A. DOUMAS / K.J. HOLYOAK / J.E. HUMMEL: The Problem with Using Associations to Carry Binding Information. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 74-75.

1974 S. z.B. Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. Brain and Mind. Vol. 3. 2002. PP. 291-312 – Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 40-41.

1975 S. R.F. HADLEY: Neural Circuits, Matrices, and Conjunctive Binding. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 80.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.07.2.

1976 S. hierzu Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. P. 46, Fig. 5.

1977 S. R. GAYLER: Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 78-79, v.a. P. 79.

1978 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.222.1.

bei auf dem PDP-Ansatz basierenden Neuroarchitekturen – nur ein neues, hinreichend ähnliches kombinatorisches Aktivitätsmuster zu erzeugen hätte, implementiert über die bereits bestehenden neuronalen Ressourcen.

6.428 Wie bereits in der Diskussion um die Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblematik bei der sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. „Tensor Product Representation (TPR)“) im Rahmen der ICS-Architektur P. SMOLENSKY's¹⁹⁷⁹ erwähnt¹⁹⁸⁰, haben J.A. FODOR, Z.W. PYLYSHYN und Br.P. McLAUGHLIN dagegen eingewendet, daß es nicht ausreicht, im Netzwerkverhalten Systematizität nur auszuführen, vielmehr werde ihre Konzeption von Systematizität erst dann wirklich erklärt, wenn man einen Strukturverarbeitungsmechanismus aufzeigen könne, der Gedankeninhalte mit Gesetzesnotwendigkeit in Beziehung bringe, wohingegen sie die sich mittels eines Lernverfahrens einstellenden Verbindungsgewichte in einem künstlichen neuronalen Netzwerk als „zufällig vom Standpunkt der Gesetzesnotwendigkeit“ (engl. „nomologically arbitrary“) betrachten.

Diese Kritik zurückweisend, argumentieren nun D.J. CHALMERS¹⁹⁸¹ und vor allem R.F. HADLEY¹⁹⁸² dahingehend, daß, erstens, diese Autoren der Klassischen Symboltheorie nomologische mit logischer Notwendigkeit verwechseln würden, und die Tatsache mißachten, daß der evolutionäre Prozeß erfolgreiche Mechanismen erzeugen könne, die, aus einer logischen Perspektive betrachtet, zufällig erscheinen, und, zweitens, ein komplexer Kompositumsvektor in einer funktionalen Relation zu seinen Konstituentenvektoren stehen könne, gemäß der Definition der sog. „funktionalen Kompositionalität“ (engl. „functional compositionality“) i.S. von T. van GELDER¹⁹⁸³, wobei er diese Definition der Kompositionalität

1979 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213, 5.1.01.214.

1980 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.422.

1981 S. D.J. CHALMERS: Connectionism and Compositionality: Why Fodor and Pylyshyn were Wrong. *Philosophical Psychology*. Vol. 6. No. 3. 1993. PP. 315-16.

1982 S. R.F. HADLEY: Cognition, Systematicity and Nomic Necessity. *Mind and Language*. Vol. 12. 1997. PP. 137-53, v.a. P. 146 – R.F. HADLEY / M.B. HAYWARD: Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning. *Minds and Machines*. Vol. 7. 1997. P. 29 – R.F. HADLEY: Systematicity in Connectionist Language Learning. *Mind and Language*. Vol. 9. 1994. P. 267 – R.F. HADLEY: Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. P. 1152.

1983 S. T. van GELDER: Classical Questions, Radical Answers: Connectionism and the Structure of Mental Representations. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 355-81, v.a. P. 364: "It is however possible to have compositional schemes of representation in which compound representations are *not* constructed by concatenation."

(...)

"If we now consider elements of the vector space as representations of the complex expression types to which they correspond, then (...) we have a scheme of representations that in an obvious sense have *constituents*, but where these constituents are merely functional parts, rather than the kind of literal parts found in concatenative schemes. We have a compositional scheme, but it is not one where the constituency relations among representations are instantiated in strict part-whole relations among tokens."

S. auch T. van GELDER: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. *Cognitive Science*. Vol. 14. 1990. PP. 361, 362, 364-75, der die Definition der sog. „funktionalen Kompositionalität“ (engl. „functional compositionality“) an einem Beispiel verdeutlicht, indem man

dabei in Abgrenzung zur sog. „konkatenativen Kompositionalität“ (engl. “concatenative compositionality”) i.S. von J.A. FODOR und Z.W. PYLYSHYN begreift: Bei dem Erzeugen von Ausdrücken bzw. einer komplexen Symbolstruktur bestehe keine Notwendigkeit, daß die Instanzen der Konstituenten in den Gesamtausdrücken selbst bewahrt bleiben, vielmehr sei für einen Kompositionalitätsmodus nur eine systematische Methode erforderlich, die gewährleiste, daß die Ausdrücke eine Art von “functional compositionality” zeigen, die gegeben sei, wenn es generelle, effektive und reliable Prozesse gibt, um, erstens, einen Ausdruck bzw. eine komplexe Symbolstruktur aus den gegebenen syntaktischen (Symbol-)Konstituenten zu erzeugen, und, zweitens, einen Ausdruck bzw. eine komplexe Symbolstruktur zurück in diese (Symbol-)Konstituenten zu zerlegen. Um also, wie es bei konnektionistischen Modellen der Fall ist, beliebig komplexe Strukturen mit räumlich begrenzt verfügbaren Repräsentationsressourcen zu verarbeiten, bedarf es einer übereinandergelagerten Informationsverarbeitung im selben Raumgebiet, weshalb im Rahmen der Informationsverarbeitungsprozesse die zeitlich früheren syntaktischen (Informations-)Komponenten zwangsläufig zerstört werden, nicht jedoch deren Wiederaufdeckbarkeit.

M.E. kann man deshalb, worauf auch Bj.Chr. KRALEMANN¹⁹⁸⁴ in Anlehnung an T. van GELDER's Definition der funktionalen Kompositionalität zu Recht hinweist, ein vektorbasiertes semantisches Kompositum in einer konnektionistischen

junktorenlogische Terme, z.B. P , $(P\&Q)$, $((P\&Q)\&R)$ usw. anhand von GÖDEL-Nummern kodiert, sodaß man anhand einer eindeutigen Verfahrensvorschrift im Rahmen der sog. „Gödelisierung“ bzw. „Gödelnummerierung“ (engl. “Gödel numbering”) einem betreffenden Term eine natürliche Zahl zuordnet derart, daß man die Potenzen, die einem bestimmten Zahlwert entsprechen, den man dem jeweiligen Term zugewiesen hat, der fortlaufenden Primzahlen miteinander multipliziert, wobei mittels des sog. „Theorems der Primfaktorzerlegung“ (engl. “prime decomposition theorem”) die Gödelnummer eines komplexen Ausdrucks in die entsprechenden Gödelnummern seiner Konstituenten zurückgerechnet werden können, ohne daß dabei die Gödelnummern der Konstituenten im komplexen Ausdruck präsent sind.

Einführend s. z.B. Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 121-24, v.a. S. 123-24: „Die Differenz zwischen der klassischen KI und der konnektionistischen Modellbildung lässt sich nun dahingehend fassen, dass in klassischen Systemen die Konstituentenrelationen (...) auf der *Produktebene* der Kognition als *syntaktische* Relationen *gleichzeitig* aktiver repräsentationaler Zustände angesiedelt sind, während der Konnektionismus die Konstituentenrelationen wesentlich auf der *Prozessebene* implementiert: als *funktionale Relationen* zwischen semantisch kompositionalen repräsentationalen Zuständen und ihren *asynchronen* Konstituenten. Repräsentationale Zustände sind deshalb kompositional, weil die kognitiven Prozesse systematisch funktionale Übergänge zu ihnen realisieren, die von Zuständen einfacheren Gehalts zu Zuständen komplexeren Gehalts führen. Es gibt demnach eine *funktionale Relation* zwischen Repräsentanten eines komplexen Gehalts und den Repräsentanten der semantischen Konstituenten dieses komplexen Gehalts, auch wenn die repräsentationalen Aktivierungsmuster der semantischen Konstituenten kein syntaktischer Teil des Aktivierungsmusters sind, das den aus den Konstituenten synthetisierten Gehalt repräsentiert.“

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.323.

1984 S. Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 124.

(Neuro-)Architektur i.S. des Prinzips der sog. „semantischen Kompositionalität“ (engl. “semantic compositionality”)¹⁹⁸⁵ realisieren, ohne daß sich eine semantische kompositionale Struktur in Form eines Kompositumvektors i.S. der funktionalen Kompositionalität in einer syntaktischen Teil/Ganzes-(Relations-)Struktur widerspiegelt, z.B. bei sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. “Tensor Product Representation (TPR)”) im Rahmen der ICS-Architektur P. SMOLENSKY's¹⁹⁸⁶. M.E. würde man jedoch eine präzisere Argumentation vornehmen, wenn man die Definition der funktionalen Kompositionalität i.S. T. van GELDER's um die auf dem mathematischen Konzept der algebraischen Struktur begründete Definition der sog. „strukturellen Kompositionalität“ (engl. “structural compositionality”)¹⁹⁸⁷ bzw. der sog. „formalen Kompositionalität“ (engl. “formal compositionality”)¹⁹⁸⁸ i.S. M. WERNING's¹⁹⁸⁹ ergänzt, wonach ein vektorbasiertes semantisches Kompositum in den konnektionistischen (Neuro-)Architekturen der sog. “Vector Symbolic Architectures (VSA)”¹⁹⁹⁰ ein homomorphes Bild der syntaktischen Struktur der Sprache sei, sodaß es damit dem modernen Prinzip der sog. „semantischen Kompositionalität“ (engl. “semantic compositionality”)¹⁹⁹¹ genügt, wodurch eine notwendige Bedingung für das Kriterium der Systematizität dieser Architekturen erfüllt wäre, wobei das sog. Prinzip der sog. „semantischen Konstituenz“ (engl. “semantic constituency”)¹⁹⁹², zum einen, z.B. bei der sog. „Tensorprodukt-Repräsentation“ (engl. “Tensor Product Representation (TPR)”) im Rahmen der ICS-Architektur P. SMOLENSKY's¹⁹⁹³, wie bereits erwähnt, nicht zutrifft, sodaß es sich um eine (Neuro-)Architektur mit einer nicht-symbolischen, kompositionalen Semantik handelt, zum anderen, z.B. bei der sog. “Holographic Reduced Representations (HRRs) T. PLATE's¹⁹⁹⁴ und bei dem sog. “Neural Engineering Framework (NEF)” Chr. ELIASMITH's und T.C. STEWART's auf Grund eines Algorithmus der Rückbindung (engl. “algorithm of unbinding”)¹⁹⁹⁵, der eine syntaktische Teil/Ganzes-(Relations-)Struktur – approximativ – zu identifizieren erlaubt, zutrifft, sodaß es sich sogar um eine (Neuro-)Architektur mit einer symbolischen, kompositionalen Semantik i.S. der sog. „formalen Kompositionalität“ (engl. “formal compositionality”)¹⁹⁹⁶ handelt, die sogar das Prinzip der sog. „semantischen Konstituenz“ (engl. “semantic constituency”)¹⁹⁹⁷ erfüllt.¹⁹⁹⁸ Diese (Neuro-)Archi-

1985 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3.

1986 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213, 5.1.01.214, 6.422.

1987 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.323.

1988 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3, 6.323.

1989 S. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-35, 635-37.

1990 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.10.

1991 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3.

1992 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4, 5.3.01.30.

1993 Siehe hierzu vor allem die Ausführungen in Kap. 5.1.01.213, 5.1.01.214, 6.422.

1994 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.1 und 5.1.02.2.

1995 S. z.B. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 637.

1996 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.3, 6.323.

1997 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.4, 5.3.01.30.

1998 S. z.B. M. WERNING: Non-symbolic Compositional Representation and Its Neuronal Foundation:

tekturen verwenden dabei das Konzept der sog. "circular convolution"¹⁹⁹⁹ als integrativen (Bindungs-)Mechanismus, sodaß über ein Rückbindungsverfahren der einmal gebundene semantische Füller- bzw. Konstituentenvektor, zumindest annäherungsweise, wiederherstellbar wird, sodaß die semantische Teil-/Ganzes-Beziehung im Rahmen einer vektorbasierten Konstituentenstruktur bewahrt wird und in diesem Sinne „präsent“ bleibt. Indem also die Zirkularkonvolutionsoperation des HRRs-Modells T. PLATE's in die NEF-Architektur Chr. ELIASMITH's und T.C. STEWART's implementiert wird, entsteht daraus m.E. eine in hohem Grade neurobiologisch plausible (Neuro-)Architektur mit einer symbolischen, kompositionalen Semantik²⁰⁰⁰, wobei sie sich – entsprechend den experimentellen Daten aus den (kognitiven) Neurowissenschaften – sowohl als sehr robust zeigt gegenüber einem zunehmenden Verlust an Neuronenressourcen (sog. "graceful degradation")²⁰⁰¹ oder einem zunehmenden (Hintergrund-)Rauschen (engl. "(background) noise"), als auch deren Leistungsgenauigkeit mit zunehmender Anzahl der Neuronenressourcen ansteigt, jedoch bei zunehmender Komplexität der (Vektor-)Strukturen abnimmt. Ferner überzeugt gemäß den Berechnungen von Chr. ELIASMITH's und T.C. STEWART's²⁰⁰² die berechnete Gesamtanzahl der Neuronen mit ungefähr 1.4 Millionen, was etwa einem Gebiet von 9 mm² des Kortex entsprechen würde, bezogen auf komplexere, implementierte algebraische Operationen zwischen verschiedenen neuronalen Gruppen, sodaß dieselbe Population von Neuronen für jede zu vollziehende (Variablen-)Kodierung und (Variablen-)Decodierung verwendet werden würde. Desweiteren kann man diese (Neuro-)Architektur – unter wissenschaftstheoretischer Perspektive betrachtend – als eine in hohem Grad empirisch testbare Theorie auffassen, da sie eine Vielzahl von meßbaren neurowissenschaftlichen Variablen verwendet, wenn auch eine Vielzahl von Fragen noch offenbleibt.²⁰⁰³

Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 636-37.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.11 und 5.3.01.30.

1999 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.02.1, 5.1.03.2.

2000 S. hierzu im einzelnen z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. PP. 1759-64 – Chr. ELIASMITH: Cognition with Neurons. A Large-Scale, Biologically Realistic Model of the Wason Task. In: G. BARA / L. BARSALOU / M. BUCCIARELLI (Eds.): Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Stresa/ Piedmont, Italy. July 21-23, 2005. 2005. PP. 1-6 – Chr. ELIASMITH: Learning Context Sensitive Logical Inference in a Neurobiological Simulation. In: S. LEVY / R. GAYLER (Eds.): AAI Fall Symposium: Compositional Connectionism in Cognitive Science. AAAI Press. 2004. PP. 17-20.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 5.1.03.5.

2001 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.282.

2002 S. z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 614.

2003 S. hierzu im einzelnen z.B. T.C. STEWART / Chr. ELIASMITH: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. P. 614.

Die Kritik J.A. FODOR's und Br.P. McLAUGHLIN's an der mangelnden expliziten physikalischen Präsenz eines Konstituentenvektors aufgreifend, argumentiert nun A. CLARK²⁰⁰⁴ in Anlehnung an den expliziten bzw. impliziten Charakter von kognitiver Information i.S. D. KIRSH's²⁰⁰⁵, daß mit einer prozeßorientierten Perspektive²⁰⁰⁶ in Bezug auf die Komputation in konnektionistischen Modellen zumindest ein gewisser Grad an Systematizität in Form von funktionaler Kompositionalität i.S. T. van GELDER's erreicht werden könne, indem man berücksichtige, daß die Frage, ob ein repräsentationales System ein semantisches Konzept explizit repräsentiere bzw. es „physikalisch präsent“ (engl. “physically present”) sei, nur relativ zum Typ des (Repräsentations-)Systems und seiner Umgebung, in die es eingebettet sei, beantwortet werden könne, weshalb der Begriff der expliziten Repräsentation im Rahmen einer prozeßorientierten Perspektive liberaler (engl. “more liberal”) verstanden werden sollte, z.B. in Form von sog. „Graden der semantischen Transparenz“ (engl. “grades of semantic transparency”)²⁰⁰⁷.

6.430 Anknüpfend an die Diskussion der Kontextproblematik von semantischen Konzepten im Rahmen der sog. „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (engl. “symbolism vs. connectionism debate”)²⁰⁰⁸ in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jhdts wird im Folgenden eine damit noch zu entwickelnde kohärenztheoretische (Neuro-)Semantik im systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus thematisiert, die im Rahmen der Lösung des Systematizitäts- und Kompositionalitätsproblems von mentalen Repräsentationen anhand von integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismen i.B.a. die sog. „Variablenbindung“ (engl. “variable binding”)²⁰⁰⁹ von einer Anzahl von Autoren²⁰¹⁰ vertreten wird, wonach von der Grundannahme der Konstanz von kontextinvarianten semantischen Konzepten in der klassischen Symboltheorie²⁰¹¹ abzurücken sei, und demgegenüber von dem Grundsatz der Kontextsensitivität von semantischen Konzepten auszugehen sei. Deshalb werden vorab die alternativen traditionellen Theorien eines Konzepts i.S. einer (internen) mentalen Repräsentation (engl. “mental representation”)²⁰¹² im Rahmen einer sog. „Repräsentationa-

2004 S. A. CLARK: The Presence of a Symbol. Connection Science. Vol. 4. 1992. PP. 193-205, v.a. PP. 201-202, 203, 204.

2005 Zum implizit-explizit Kontinuum von kognitiver Information s. D. KIRSH: When is Information Explicitly Represented? In: P. HANSON (Ed.): Information, Language and Cognition. UBC Press. Vancouver/BC. 1991. PP. 340-65.

2006 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 5.1.01.20, 5.1.01.31 und 5.1.01.32.

2007 S. A. CLARK: Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1989. PP. 114-18.

2008 Eingehend hierzu s. z.B. H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. Kap. 4.1, 4.11-4.15. BoD-Verlag. Nordstedt. (2006) 2009.

2009 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.30.

2010 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.437.1-3 und Kap. 6.437.5.

2011 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.1.

2012 Zum Begriff der (internen) mentalen Repräsentation (engl. “mental representation”) s. z.B. K. VOGLEY / A. BARTELS: Repräsentation in den Neurowissenschaften. In: H.J. SANDKÜHLER (Hrsg.): Theorien und Begriffe der Repräsentation. Schriftenreihe der von der VolkswagenStiftung geförderten Forschungsgruppe Repräsentation. Bd. 1. Bremen. 2006. S. 99-113 – J. ENGELKAMP / T. PECHMANN: Kritische Anmerkungen zum Begriff der mentalen Repräsentation. In: J. ENGELKAMP / T. PECHMANN (Hrsg.): Mentale Repräsentation. Huber Verl. Bern. 1993. S. 7-16 – Th. HERR-

len Theorie des Geistes“ (engl. “Representational Theory of Mind (RTM)”) ²⁰¹³ in der Kognitionswissenschaft, der (kognitiven) Psychologie, der (Psycho-)Linguistik und der (Neuro-)Philosophie kurz skizziert werden, wobei dabei die Diskussion von semantischen Konzepten (engl. “semantic concepts”) ²⁰¹⁴, vor allem von sog. „lexikalischen Konzepten“ (engl. “lexical concepts”) ²⁰¹⁵ im Vordergrund stehen wird ²⁰¹⁶:

MANN: Mentale Repräsentation – ein erläuterungsbedürftiger Begriff. In: J. ENGELKAMP / T. PECHMANN (Hrsg.): Mentale Repräsentation. Huber Verl. Bern. 1993. S. 17-30 – M.F. PESCHL: Epistemologische und methodologische Fragen an den traditionellen Repräsentationsbegriff in der klassischen Cognitive Science. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): Repräsentationismus – was sonst? Braunschweig. 1996. S. 119-38 – D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 77-83.

Einführend s. z.B. D. PITT: Mental Representation. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (July 21, 2008 Edition).

2013 S. z.B. J.A. FODOR: Psychosemantics. MIT Press. Cambridge/MA. 1987 – J. FODOR: Hume Variations. Oxford University Press. Oxford. 2003 – P. CARRUTHERS: Phenomenal Consciousness: A Naturalistic Theory. Cambridge University Press. New York. 2000 – R. MILLIKAN: On Clear and Confused Ideas. An Essay about Substance Concepts. Cambridge University Press. Cambridge. 2000 – E. MARGOLIS / St. LAURENCE: The Ontology of Concepts – Abstract Objects or Mental Representations? Noûs. Vol. 41. 2007. PP. 561-93.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.145.

Zur Kritik s. z.B. D. DENNETT: A Cure for the Common Code. In: D. DENNETT: Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology. 4. Aufl. MIT Press. Cambridge/MA. (1977, 1978) 1988. PP. 90-108 – D. DENNETT: The Intentional Stance. MIT Press. Cambridge/MA. 1990.

2014 Zum Begriff des sog. „semantischen Konzepts“ (engl. “semantic concept”) s. z.B. P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 59-75.

2015 Zum Begriff des sog. „lexikalischen Konzepts“ (engl. “lexical concept”) s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. P. 4 Fn. 2.

2016 Die Darstellung orientiert sich dabei an St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 3-81.

Eingehend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 3-81 – B. HJØRLAND: Concept Theory. Journal of the American Society for Information Science and Technology. Vol. 60. 2009. PP. 1519-36 – M. KAVOURAS / M. KOKLA: Theories of Geographic Concepts: Ontological Approaches to Semantic Integration. CRC Press. Boca Raton/FL. 2007. PP. 85-91.

Einführend s. z.B. J.A. HAMPTON: Concepts. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999 PP. 176-79 – J.K. KRUSCHKE: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 653-59 – J. PRINZ: Concepts, Philosophical Issues about. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 659-66 – A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 670-73 – D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 77-83 – G. REY: Concepts. In: S. Guttenplan (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell. Cambridge/MA. 1994. PP. 185-93.

S. z.B. in der Psychologie und (Psycho-)Linguistik S. WINKEL / Fr. PETERMANN / U. PETERMANN: Lernpsychologie. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn. 2006. S. 157-67 – J.R. ANDERSON: Kognitive Psychologie. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verl. Heidelberg u.a. 1996. S. 147-64 – A. LINKE /

6.431 Nach der sog. „Klassischen Konzepttheorie“ (engl. “Classical Theory of Concepts”)²⁰¹⁷ i.S. von N. CHOMSKY, G. FREGE, R. CARNAP, P. THAGARD, J.J. KATZ, J.S. BRUNER, E.E. SMITH und Th. ECKES, auch als “Definitionism”, “Definition Theory” oder “Definition View” bezeichnet, besitzt ein (lexikalisches) Konzept eine (logische) Definitionsstruktur (engl. “definitional structure”)²⁰¹⁸, d.h. ein Konzept bzw. ein Begriff bestimmt eine Menge von notwendigen und zugleich hin-

M. NUSSBAUMER / P.R. PORTMANN: Studienbuch Linguistik. 4. Aufl. Max Niemeyer Verl. Tübingen. 2001. S. 341-53 – G. GREWENDORF / Fr. HAMM / W. STERNEFELD: Sprachliches Wissen. Eine Einführung in moderne Theorien der grammatischen Beschreibung. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1993. S. 305-16 – J. MEIBAUER: Einführung in die germanistische Linguistik. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verl. Stuttgart u.a. 2002. S. 169-73, 184-90 – J. ENGELKAMP / H.D. ZIMMER: Lehrbuch der kognitiven Psychologie. Hogrefe. Göttingen u.a. 2006 – Fr. RÖSLER: Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die Kognitive Neurowissenschaft. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011. S. 361-86 – Kl. OPWIS / G. LÜER: Modelle der Repräsentation von Wissen. In: N. BIRBAUMER et al. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Ser. 2: Kognition. Bd. 4: Gedächtnis. Hogrefe. Göttingen u.a. 1996. S. 337-431 – R.J. STERNBERG: Cognitive Psychology. 3th Ed. Thomson/ Wadsworth. Belmont/ CA. 2003. PP. 252-63 – D. REISBERG: Cognition. Exploring the Science of the Mind. 3rd Ed. W.W. Norton & Company. New York, London. 2007. PP. 288-322.

S. auch M. DAHLGRÜN: Concepts: Foundational Issues. Dissertation. Universität Tübingen. Fakultät für Philosophie und Geschichte. Philosophisches Seminar. 2006. PP. 96-128.

S. einführend E. MARGOLIS / St. LAURENCE: Concepts. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (May 17, 2011 Edition) – D. PITT: Mental Representation. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (July 21, 2008 Edition) – J. BERMÚDEZ / A. CAHEN: Non-conceptual Content. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (March 16, 2011 Edition).

2017 Grundlegend s. z.B. G. FREGE: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE: Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. G. PATZIG (Hrsg.). Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962 – R. CARNAP: Logische Syntax der Sprache. Springer. Wien. 1934 – J. KATZ / J.A. FODOR: The Structure of a Semantic Theory. Language. Vol. 39. 1963. PP. 170-210 – J.S. BRUNER: The Course of Cognitive Growth. American Psychologist. Vol. 19. 1964. PP. 1-15 – J.J. KATZ / P.M. POSTAL: An Integrated Theory of Linguistic Description. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. (1964) 1965 – J.J. KATZ: Philosophy of Language. Harper & Row. New York. 1966 – J.J. KATZ: Semantic Theory. Harper and Row. New York. 1972.

Einführend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 8-27 – J.A. HAMPTON: Concepts. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999 P. 178 – J.K. KRUSCHKE: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 656 – J. PRINZ: Concepts, Philosophical Issues about. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 661-62 – A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 671 – D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. P. 79 – S. WINKEL / Fr. PETERMANN / U. PETERMANN: Lernpsychologie. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn. 2006. S. 157-62.

Zur Kritik s. z.B. E. SMITH / D. MEDIN: Categories and Concepts. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1981 – G. MURPHY / D. MEDIN: The Role of Theories in Conceptual Coherence. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 425-58 – G. MURPHY: The Big Book of Concepts. MIT Press. Cambridge/MA. 2002.

Bisweilen wird auch die Bezeichnung “Rule(-Based) Theory” verwendet. S. z.B. J.K. KRUSCHKE: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive

reichenden Bedingungen anhand seiner (Konzept-)Komponenten bzw. (Begriffs-)Eigenschaften im Rahmen des Prinzips der semantischen Kompositionalität, damit eine Sache oder ein Sachverhalt in seine (Klassen-)Extension²⁰¹⁹ fällt, m.a.W. ein Konzept weist auf einen psychologischen Prozeß hin, anhand dessen an einer wahrgenommenen Sache oder einem Sachverhalt begriffliche Eigenschaften aufgewiesen worden sind, sodaß damit definitiv als notwendige und zugleich hinreichende Bedingungen diese Sache oder Sachverhalt einem (Allgemein-)Begriff zugeordnet werden kann, d.h. unter ihn „subsumiert“ werden kann.

Nach der sog. „Neoklassischen Konzepttheorie“ (engl. “Neoclassical Theory of Concepts”)²⁰²⁰ i.S. von J. JACKENDOFF, St. PINKER und G. REY besitzt ein (lexikalisches) Konzept nur noch eine partielle Definitionsstruktur (engl. “partial definitions”)²⁰²¹, d.h. ein Konzept bzw. ein Begriff bestimmt zwar noch eine Menge von notwendigen, aber nicht mehr hinreichenden Bedingungen anhand seiner (Konzept-)Komponenten bzw. (Begriffs-)Eigenschaften, damit eine Sache oder ein Sachverhalt unter ihn „subsumiert“ werden kann.

6.432 Nach dem sog. „Konzeptuellen Atomismus“ (engl. “Conceptual Atomism”)²⁰²² i.S. von J. FODOR und R. MILLIKAN besitzt ein (lexikalisches) Konzept

Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 656.

2018 S. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / S. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. P. 9.

2019 Zu den Begriffen der Extension (engl. “extension”) vs. Intension s. z.B. (engl. “intension”) s. z.B. W. STELZNER: Extension/Intension. In: H.J. SANDKÜHLER (Hrsg.): Enzyklopädie Philosophie. Bd. 1. Felix Meiner Verlag. Hamburg. 2010. S. 683-84.

Zur Kritik der extensionalen Konzeptinterpretation in der Psychologie s. z.B. A. TREISMAN: Properties, Parts, and Objects. In: K.R. BOFF / L. KAUFMAN / J.P. THOMAS (Eds.): Handbook of Perception and Human Performance. Vol. 2. Wiley. New York – D.L. MEDIN: Concepts and Conceptual Structure. American Psychologist. Vol. 44. 1988. PP. 1469-81 – Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Connectionist Representation, Semantic Compositionality, and the Instability of Concept Structure. Psychological Research. Vol. 52. No. 2-3. 1990. PP. 253-70.

2020 Grundlegend s. z.B. R. JACKENDOFF: Semantics and Cognition. MIT Press. Cambridge/MA. 1983 – St. PINKER: Learnability and Cognition: The Acquisition of Argument Structure. MIT Press. Cambridge/MA. 1989 – G. REY: The Unavailability of What we Mean: A Reply to Quine, Fodor, and Lepore. In: J.A. FODOR / E. LEPORE (Eds.): Holism: A Consumer Update. Rodopi B.V. Atlanta. 1993. PP. 61-101.

Einführend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 52-59.

2021 S. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / S. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. P. 52.

2022 Grundlegend s. z.B. J.A. FODOR: A Theory of Content, I: The Problem. In: J.A. FODOR: A Theory of Content and other Essays. MIT Press. Cambridge/MA. 1990. PP. 51-87 – J.A. FODOR: A Theory of Content, II: The Theory. In: J.A. FODOR: A Theory of Content and other Essays. MIT Press. Cambridge/MA. 1990. PP. 89-136 – J.A. FODOR: Information and Representation. In: P. HANSON (Ed.): Information, Language and Cognition. University of British Columbia Press. 1990. PP. 175-90 – J.A. FODOR: Concepts: Where Cognitive Science Went Wrong. Clarendon Press. Oxford. 1998 – R. MILLIKAN: On Clear and Confused Ideas. An Essay about Substance Concepts. Cambridge University Press. Cambridge. 2000.

Einführend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 59-71 – J.A. HAMPTON: Concepts. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 177 – J. PRINZ: Concepts, Philosophi-

bzw. ein Begriff keine semantische Struktur, sondern es wird ausschließlich bestimmt anhand einer angemessenen kausalen informationellen (Kor-)Relation zu den Gegenständen in der Welt.

6.433 Nach der sog. „Theorie-Theorie der Konzepte“ (engl. “Theory-Theory of Concepts”)²⁰²³ i.S. von S. CAREY, F. KEIL, A. GOPNIK, A.N. MELTZOFF, G. MURPHY, L.J. RIPS, D. MEDIN und A. ORTONY, auch als “Explanation-Based View” bezeichnet, betrachtet die Struktur eines (lexikalischen) Konzepts in Analogie zu der eines (theoretischen) Terms in einer wissenschaftlichen Theorie, d.h. ein Konzept bzw. ein Begriff wird anhand seiner kognitiven Funktion bestimmt, die er in der betreffenden mentalen Theorie einnimmt, m.a.W. anhand seiner Rolle in mentalen Erklärungsschematas, in die er eingebettet ist.

6.434 Nach der sog. „Prototypentheorie von Konzepten“ (engl. “Prototype Theory of Concepts”)²⁰²⁴ i.S. von E. ROSCH, C. MERVIS, G. LAKOFF und W. LABOV

cal Issues about. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 664-65.

Zur Kritik s. z.B. B. LEVIN / St. PINKER: Introduction. In: B. LEVIN / St. PINKER: *Lexical and Conceptual Semantics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1991. PP. 1-7 – R. JACKENDOFF: What Is a Concept, that a Person May Grasp it? *Mind and Language*. Vol. 4. 1989. PP. 68-102 – G. REY: The Unavailability of What we Mean: A Reply to Quine, Fodor, and Lepore. In: J.A. FODOR / E. LEPORE (Eds.): *Holism: A Consumer Update*. Rodopi B.V. Atlanta. PP. 61-101.

2023 Grundlegend s. z.B. S. CAREY: *Conceptual Change in Childhood*. MIT Press. Cambridge. 1985 – D.L. MEDIN / A. ORTONY: Psychological Essentialism. In: S. VOSNIADOU / A. ORTONY (Eds.): *Similarity and Analogical Reasoning*. Cambridge University Press. New York. 1989. PP. 179-95 – Fr.C. KEIL: *Concepts, Kinds and Cognitive Development*. MIT Press. Cambridge/MA. 1989 – A. GOPNIK / A.N. MELTZOFF: *Words, Thoughts, and Theories*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997 – S. CAREY: Knowledge Acquisition: Enrichment or Conceptual Change. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): *Concepts: Core Readings*. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 459-87 – G. MURPHY / D. MEDIN: The Role of Theories in Conceptual Coherence. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): *Concepts: Core Readings*. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 425-58 – S. ATRAN / D. MEDIN: *The Native Mind and the Cultural Construction of Nature*. MIT Press. Cambridge/MA. 2008 – S. CAREY: *The Origin of Concepts*. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 447-86, v.a. PP. 484-86, PP. 487-538, v.a. PP. 499-502, 535-36.

Einführend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: *Concepts and Cognitive Science*. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): *Concepts: Core Readings*. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 43-51 – J.A. HAMPTON: *Concepts*. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999 P. 178 – J. PRINZ: *Concepts, Philosophical Issues about*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 663-64 – A.B. MARKMAN: *Conceptual Representations in Psychology*. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 671-72 – D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: *Concepts*. In: M.W. EYSENCK (Ed.): *The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology*. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 80-81.

Zur Kritik s. z.B. J. FODOR / E. LEPORE: *Holism: A Shopper's Guide*. Blackwell. Cambridge. 1992.

2024 Grundlegend s. z.B. E. ROSCH / C. MERVIS: *Family Resemblances: Studies in the Internal Structure of Categories*. *Cognitive Psychology*. Vol. 7. 1975. PP. 573-605 – E. ROSCH: *Cognitive Representations of Semantic Categories*. *Journal of Experimental Psychology: General*. Vol. 104. 1975. PP. 192-232 – E. ROSCH / C.B. MERVIS / W.D. GRAY / D.M. JOHNSON / P. BOYES-BRAEM: *Basic Objects in Natural Categories*. *Cognitive Psychology*. Vol. 8. 1976. PP. 382-439 – E. ROSCH: *Principles of Categorization*. In: E. ROSCH / B. LLOYD (Eds.): *Cognition and Categorization*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 27-48 – E. ROSCH: *Prototype Classification and Logical Classification: The two Systems*. In: E.K. SCHOLNICK (Ed.): *New Trends in Conceptual Representation: Challenges to Piaget's Theory*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1983. PP. 73-86.

besitzt ein (lexikalisches) Konzept eine probabilistische prototypische Struktur, d.h. ein Konzept bzw. ein Begriff hat einer hinreichenden Anzahl von möglichst ähnlichen (Konzept-)Komponenten bzw. (Begriffs-)Eigenschaften zu genügen kodiert anhand einer statistischen Analyse eben dieser (Konzept-)Komponenten, damit ein Begriff auf eine Sache oder einen Sachverhalt angewendet werden kann, wobei die verschiedenen (Begriffs-)Merkmale in unterschiedlicher Weise gewichtet werden, sodaß sogar manche Instanzen der Extension eines Konzepts gewisse (Begriffs-)Merkmale nicht aufzuweisen brauchen. Damit besteht die Kategorisierungsstrategie darin, daß man im Rahmen eines Ähnlichkeitsvergleichsprozesses die Instanzen hervorhebt, die einen (statistischen) Prototyp der Kategorie erzeugen können, die somit – verglichen mit anderen – ein typischeres (engl. "more typical") Beispiel für ein Konzept darstellen.

6.435 Nach der sog. „Exemplartheorie von Konzepten“ (engl. "Exemplar Theory of Concepts")²⁰²⁵ i.S. von E.E. SMITH und D.L. MEDIN besitzt ein (lexikalisches)

Einführend s. z.B. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 27-43 - J.A. HAMPTON: Concepts. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. P. 178 - J.K. KRUSCHKE: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 655-56 - J. PRINZ: Concepts, Philosophical Issues about. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 662-63 - A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 671 - D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 79-80 - S. WINKEL / Fr. PETERMANN / U. PETERMANN: Lernpsychologie. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn. 2006. S. 163-67.

Zur Kritik s. z.B. J. FODOR / E. LEPORE: The Red Herring and the Pet Fish: Why Concepts still can't be Prototypes. Cognition. Vol. 58. 1996. PP. 253-70 - J.A. FODOR: Concepts: Where Cognitive Science Went Wrong. Clarendon Press. Oxford. 1998.

Zur Kritik an dieser Kritik s. z.B. J. PRINZ: Furnishing the Mind. Concepts and their Perceptual Basis. MIT Press. Cambridge/MA. 2002 - P. ROBBINS: How to Blunt the Sword of Compositionality. Noûs. Vol. 36. 2002. PP. 313-34 - J. HAMPTON / M. JÖNSSON: Typicality and Compositionality: The Logic of Combining Vague Concepts. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 385-402.

Die Prototypentheorie und die Exemplartheorie von Konzepten werden manchmal auch unter der Bezeichnung der sog. "Similarity-Based Models of Concepts" zusammengefaßt. S. z.B. A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 671.

2025 Grundlegend s. z.B. E.E. SMITH / D.L. MEDIN: Categories and Concepts. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1981 - D.L. MEDIN / E.J. SHOBNEN: Context and Structure in Conceptual Combination. Cognitive Psychology. Vol. 20. 1988. PP. 158-90 - R.M. NOSOFSKY: Exemplar-Based Accounts of Relations between Classification, Recognition and Typicality. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition. Vol. 14. 1988. PP. 700-708.

Einführend s. z.B. J.A. HAMPTON: Concepts. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL: The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 177, 178 - J.K. KRUSCHKE: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 653-55 - A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 671 - D.L. MEDIN / R.L. GOLDSTONE: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. P. 80.

Konzept bzw. ein Begriff zwar auch eine probabilistische Struktur, jedoch wird es nicht anhand eines Prototyps erzeugt, sondern es wird jedes (neue) Exemplar einer Kategorie gespeichert, u.z. hängt der Grad der Wahrscheinlichkeit als ein Element einer Kategorie klassifiziert zu werden von der Ähnlichkeit des betreffenden Exemplars zu den bereits kodierten Exemplaren ab.

6.436 In neuerer Zeit wird schließlich von St. LAURENCE und E. MARGOLIS²⁰²⁶ ein sog. „konzeptueller Pluralismus“ (engl. “Conceptual Pluralism”) vertreten, wonach ein (lexikalisches) Konzept bzw. ein Begriff eine Vielzahl (engl. “plurality”) von verschiedenen Strukturtypen (engl. “types of structure”) besitzt, die verschiedene Komponenten des Konzepts darstellen, abhängig davon, welche spezifische (Erklärungs-)Funktion (engl. “explanatory role”) ihnen damit gerade zugeordnet werden soll, bezogen auf konzeptuelle (Funktions-)Kriterien wie z.B. Referenz, Kategorisierung, Kompositionalität, Inferenz und Stabilität.²⁰²⁷ Eine andere Variante des konzeptuellen Pluralismus vertritt D.Aa. WEISKOPF²⁰²⁸, wonach jeder Strukturtyp selbst bereits wieder ein eigenes (Sub-)Konzept darstellt, wohingegen der sog. „konzeptuelle Eliminativismus“ (engl. “Concept Eliminativism”) nach E. MACHERY²⁰²⁹ die signifikanten Gemeinsamkeiten eines Konzepts i.S. einer natürlichen Art (engl. “natural kind”) gerade bestreitet.

6.437 Seit den achtziger Jahren des 20. Jhdts ist nun im Rahmen eines Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus, d.h. vor allem vor dem Hintergrund einer (mathematischen) Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme²⁰³⁰, versucht worden, eine alternative, vektor-basierte Konzeption des semantischen Konzepts zu entwerfen²⁰³¹:

6.437.1 Mit Bezug auf das mathematische Modell eines Attraktors im (System)-

Die Prototypentheorie und die Exemplartheorie von Konzepten werden manchmal auch unter der Bezeichnung der sog. “Similarity-Based Models of Concepts” zusammengefaßt.

S. z.B. A.B. MARKMAN: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 671.

2026 S. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / ST. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 72-75 – E. MARGOLIS / St. LAURENCE: Concepts. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (May 17, 2011 Edition).

2027 S. St. LAURENCE / E. MARGOLIS: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / ST. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. P. 72.

2028 S. D.Aa. WEISKOPF: The Plurality of Concepts. Synthese. Vol. 169. 2009. PP. 145-73, v.a. PP. 155-62.

2029 S. E. MACHERY: Doing without Concepts. Oxford University Press. New York. 2009 – E. MACHERY: Precis of Doing without Concepts. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 33. 2010. PP. 195-244.

2030 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.2.

2031 Einführend s. z.B. A. CLARK / Chr. ELIASMITH: Philosophical Issues in Brain Theory and Connectionism. In: M. ARBIB (Ed.): Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. PP. 886-88, v.a. P. 886 – P. THAGARD: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005. PP. 113-17.

Einen einführenden umfassenden Überblick bietet z.B. H. JAEGER: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 162-65.

Zustandsraum²⁰³² haben nun eine Vielzahl von Autoren²⁰³³ in der Neuroinformatik und in der komputationalen Neurowissenschaft, z.B. Fr. PASEMANN²⁰³⁴, D.J. AMIT²⁰³⁵, W. DUCH²⁰³⁶, P. SMOLENSKY²⁰³⁷, J.L. ELMAN²⁰³⁸, I. TSUDA²⁰³⁹, E. BIENENSTOCK²⁰⁴⁰ und O. SPORNS²⁰⁴¹, versucht, dieses dynamische Modell auf das Problem der Analyse und Repräsentation von (neuro-)kognitiven Konzepten i.w.S.²⁰⁴² anzuwenden, wobei es sowohl im Rahmen der Wahrnehmungskognition (sog. "low-level cognition") eingesetzt worden ist, z.B. von St. GROSSBERG²⁰⁴³ bei der kortikalen Kodierungsanalyse eines visuellen Perzepts, oder von W. FREEMAN²⁰⁴⁴ bei der Kodierungsanalyse eines olfaktorischen Perzepts, als auch eben in der Sprachverarbeitungskognition (sog. "high-level cognition"), z.B. von J. PETITOT²⁰⁴⁵ bei dem Problem der syntaktischen Konstituenz (engl. "syntactic constituency") und vor allem bei der Repräsentation von kontextsensitiven semantischen Konzepten, z.B. vom Physiker und Neuroinformatiker Helge RITTER zusammen mit dem finnischen Ingenieur und Neuroinformatiker Teuvo KOHONEN²⁰⁴⁶. Dabei wird der multidimensionale (semantische) (System-) Zustandsraum mit dem Algorithmus einer "Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)"²⁰⁴⁷ derart in kohärente Regionen (engl. "coherent regions")²⁰⁴⁸ partitioniert, daß eine sog. „kontextuelle Karte“ (engl. "contextual map")²⁰⁴⁹ bzw. eine sog. „semantische Karte“ (engl. "semantic map")²⁰⁵⁰ erzeugt wird, die die semantischen Relationen der Daten(-vektoren) in Form von (Tier-)Begriffen, wie z.B. 'goose', 'hawk', 'wolf', 'zebra' usw., anhand der relativen Distanzen – i.S. einer vektoriellen Distanzmetrik²⁰⁵¹ – im Zustandsraum wiedergibt, bezogen auf

2032 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.222, 1.232.

2033 Siehe hierzu vor allem auch die Ausführungen in Kap. 5.2, 4.4.

2034 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.04, v.a. 5.2.04.1.

2035 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.06, v.a. 5.2.06.1.

2036 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.05, v.a. 5.2.05.02.

2037 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.3.02.

2038 S. z.B. J.L. ELMAN: Connectionist Models of Cognitive Development: Where Next? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 9. 2005. PP. 111-17, v.a. P. 112.

2039 S. z.B. I. TSUDA: Toward an Interpretation of Dynamic Neural Activity in Terms of Chaotic Dynamical Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 24. 2001. PP. 793-847.

2040 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.2.

2041 S. z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 255-75, v.a. PP. 262-66.

2042 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.20.

2043 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02, 4.4.02.7.

2044 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.01, v.a. 5.2.01.1.

2045 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.02, v.a. 5.2.02.1.

2046 S. H. RITTER / T. KOHONEN: Self-Organizing Semantic Maps. Biological Cybernetics. Vol. 61. 1989. PP. 241-54, v.a. PP. 246-50.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 4.4.01.3.

2047 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01.

2048 S. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. PP. 474-76, v.a. P. 474.

2049 S. z.B. S. HAYKIN: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999. P. 475.

2050 H. RITTER / T. KOHONEN: Self-Organizing Semantic Maps. Biological Cybernetics. Vol. 61. 1989. P. 251.

2051 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

die statistische (Verteilungs-)Analyse der kontextuellen Eigenschaftswerte (engl. "attribute values"), die jeweils während des Trainings des Netzes mit einem bestimmten Begriff dargeboten worden waren, z.B. 'is small', 'has legs', 'likes to hunt' usw. Demzufolge haben sich die Begriffe zu sog. Clustern (engl. "clusters")²⁰⁵² gruppiert, abhängig von den wesentlichen „Familienbeziehungen“ (engl. "family-relationships") zwischen den jeweiligen (Tier-)Begriffen, sodaß z.B. die topologische Partition(-sklasse) der Jäger und die der Gejagten daraus hervorgeht.

6.437.2²⁰⁵³ Unter Berufung auf die sog. „korrelationale Theorie der Semantik“ nach Fr. DRETSKE²⁰⁵⁴, die mit der konnektionistischen Konzeption der (völlig) verteilten Repräsentation verbunden wird, vertreten nun der Psychologe und Philosoph Thomas GOSCHKE und der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Dirk KOPPELBERG²⁰⁵⁵ eine kontextsensitive Rahmentheorie von Kompositionalität, semantischer Produktivität und Systematizität i.S. des sog. "Parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling"²⁰⁵⁶, die im Sinne einer alternativen konnektionistischen Prozeßtheorie zur Repräsentation von semantischen Konzepten und deren Kombination aufzufassen sei, da, trotz zahlreicher empirischer Experimente aus der Psycholinguistik und der Kognitiven Psychologie²⁰⁵⁷, die Kontextsensitivität von semantischen Konzepten von den Autoren der Klassischen Symboltheorie, wie J.A. FODOR und Z.W. PLYSHYN²⁰⁵⁸ nicht genügend berücksichtigt worden sei. Vielmehr lasse sich der Widerspruch zwischen dem Prinzip der Kontextsensitivität und dem der (semantischen) Kompositionalität anhand der Arbeitsweise der (neuro-)kognitiven Modellierung im Rahmen des "Parallel (Soft) Constraint Satisfaction Modeling" auflösen: Indem man beobachtet, wie die Darbietung einer bestimmten Abfolge an Eingabemustern der gleichen (semantischen) Kategorie zu einem charakteristischen Aktivierungsmuster einer Gruppe von neuronalen Verarbeitungseinheiten führt, die damit gleichsam, i.S. eines „statistischen Detektors“ arbeitend, ein semantisches Konzept in Form eines sta-

2052 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

2053 Dieses Kapitel ist eine überarbeitete Fassung des Kapitels 5.622 meiner Magisterarbeit: H. MAURER: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag, Norderstedt. (2006) 2009.

2054 S. z.B. Fr. DRETSKE: Knowledge and the Flow of Information. MIT Press. Cambridge/MA. 1981 – Fr. DRETSKE: Explaining Behavior. Reasons in a World of Causes. MIT Press. Cambridge/MA. 1988.

2055 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 90-101 – T. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: The Concept of Representation and the Representation of Concepts in Connectionist Models. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 146-53 – Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Connectionism and the Semantic Content of Internal Representation. Review of International Philosophy. Vol. 44. 1990. PP. 87-103.

2056 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.22.

2057 S. einführend z.B. J.R. ANDERSON: Kognitive Psychologie. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1996.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.434.

2058 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.1, 6.41, 6.422.

tistischen Prototypen²⁰⁵⁹ konstruieren. Dies kann man nun dahingehend interpretieren, daß man, z.B. im Rahmen von sog. „(multivaria(n)te) Clusteranalyse“ (engl. “Multivaria(n)te Cluster Analysis (MCA)”) ²⁰⁶⁰, eine stabile statistische Korrelation zwischen der Menge der Eingabemuster der gleichen (semantischen) Kategorie und der Menge von Punkten in einem bestimmten Raumzeitgebiet des (System-)Zustandsraumes²⁰⁶¹ erhält, sodaß demnach „der repräsentative Inhalt einer Region, [z.B. in Form eines Attraktor(-bassin-)s²⁰⁶² (A.d.V.)], im Zustandsraum durch ihre Indikatorfunktion festgelegt wäre“²⁰⁶³, d.h. innere (Aktivierungs-)Zustände des Netzwerks tragen deshalb „Bedeutung“, „weil sie verlässliche Anzeichen bzw. Indikatoren für das Vorliegen bestimmter äußerer Zustände sind“, m.a.W. „ihre Bedeutung daraus geschlossen wird, was sie anzeigen“.²⁰⁶⁴ Ein Eingabemuster in Form eines Vektors, z.B. ein zusammengesetzter sprachlicher Ausdruck, kann man nun mit Th. GOSCHKE und D. KOPPELBERG als eine weitere Randbedingung betrachten, die auf die fortlaufende, sich ständig im Fluß befindliche Berechnung der Verbindungsgewichte des Netzwerks derart einwirkt, daß dabei sowohl die Randbedingungen, die durch die Eingabe selbst gesetzt werden, als auch die, die durch die bereits feststehenden Verbindungsgewichte des Netzes gesetzt werden, gleichzeitig zusammenwirken, wobei das Ziel des Berechnungsvorgangs darin besteht, eine relativ stabile Struktur, z.B. einen Attraktor, im Zustandsraum anzustreben, der möglichst viele der Randbedingungen zugleich erfüllt. Z.B. bestimmt, zum einen, der sprachliche Kontext eines Gesamtausdrucks, in den ein Wort eingebettet ist, als sog. „äußere Kontextvektoren“²⁰⁶⁵ – unter Hinweis auf J.L. McCLELLAND und A.H. KAWAMOTO²⁰⁶⁶ – zusätzliche Randbedingungen, die die Energiefunktion modulieren, zum anderen, wirken nicht nur Eingabeeinheiten, sondern auch andere innere Berechnungseinheiten, die sog. “hidden units”²⁰⁶⁷, auf die jeweiligen Verarbeitungseinheiten eines Netzes ein, sodaß auch diese sog. „inneren Kontextvektoren“²⁰⁶⁸ dessen Energiefunktion modulieren. Daneben wird der aktuelle Kontext auch die Ähnlichkeit zwischen den Eingabemustern verschiedener (semantischer) Kategorien bestimmen, da diese – i.S. einer vektoriellen Di-

2059 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.01, 4.4.02.

2060 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

2061 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.21-1.23.

2062 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.222, 5.2.

2063 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 92.

2064 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 69.

2065 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 96.

2066 S. J.L. McCLELLAND / A.H. KAWAMOTO: Mechanisms of Sentence Processing: Assigning Roles to Constituents of Sentences. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 272-325.

2067 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.211, Fn. 10.

2068 S. Fn. 188.

stanzmetrik²⁰⁶⁹ – anhand des Abstands zwischen den Punkten im (System-)Zustandsraum angegeben wird, durch den die Muster repräsentiert werden. M.E. kann man deshalb mit Th. GOSCHKE und D. KOPPELBERG²⁰⁷⁰ zu Recht argumentieren, daß damit ein semantisches Konzept im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus zumindest angemessen modelliert werden kann, da – prinzipiell – die syntaktischen, semantischen und pragmatischen Strukturrelationen anhand einer statistischen Korrelation transformiert werden können – im Rahmen einer Strukturähnlichkeitsrelation anhand einer mathematisch exakten vektoriellen Distanzmetrik von Raumpunkten im (System-)Zustandsraum, wobei sämtliche Kontextinformationen in der selbstorganisierten Neurodynamik des Netzwerks berücksichtigt werden, da jede noch so kleine graduelle Veränderung der Vektor(-komponent-)en eines aktivierten Neurons bzw. der seiner Synapsen sich in der Veränderung der Distanztopologie der Potential- bzw. Energielandschaft eines Netzwerks widerspiegelt.²⁰⁷¹

6.437.3 Ein kontextsensitives konnektionistisches Modell von (semantischen) Konzepten in der Philosophie und Wissenschaftstheorie wird vor allem im Rahmen der sog. „Zustandsraum-Semantik“ (engl. “State-Space Semantics (SSS)”) ²⁰⁷² von P.M. CHURCHLAND vertreten, die jedoch neben den bereits erörterten Einwänden von J. FODOR und E. LEPORE²⁰⁷³ daneben vielfache Kritiken, z.B. von C. GAUKER²⁰⁷⁴, Fr. CALVO GARZÓN²⁰⁷⁵ und E. TIFFANY²⁰⁷⁶, erfahren hat. Daneben haben sich auch P. GÄRDENFORS²⁰⁷⁷, T. van GELDER²⁰⁷⁸ und O. BREID-

2069 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

2070 S. Th. GOSCHKE / D. KOPPELBERG: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 95, 96, 97, v.a. S. 99, 100: „Daß mit der Erfüllung multipler Randbedingungen in verteilten Netzen keine echte syntaktische Konstituentenstruktur implementiert wird, muß nicht notwendigerweise bedeuten, daß die Bedeutungen einfacher Ausdrücke nichts zur Interpretation des komplexen Ausdrucks beitragen. (...) Was uns Constraint-Satisfaction-Modelle vielmehr zeigen, ist, daß die Beziehungen zwischen der Bedeutung einzelner Worte und der Interpretation komplexer Ausdrücke sehr viel komplizierter sein mögen, als man gehofft hätte. (...)“

Während äußere Symbolsysteme, wie die Sprache, durch eine syntaktische Konstituentenstruktur charakterisiert sein mögen, muß dies nicht auch für die inneren Repräsentationen gelten, die der Fähigkeit zugrundeliegen, äußere Symbolsysteme zu verwenden. Es mag stattdessen ausreichen, eine geeignete Verbindung äußerer Symbole (z.B. geschriebener Worte) mit inneren verteilten Repräsentationen von Konzepten herzustellen.“

2071 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.2, 4.4.

2072 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.01.1.

2073 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.01.1.

2074 S. z.B. C. GAUKER: A Critique of the Similarity Space Theory of Concepts. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 317-45, v.a. PP. 321-33.

2075 S. z.B. Fr. CALVO GARZÓN: State Space Semantics and Conceptual Similarity: A Reply to Churchland. *Philosophical Psychology*. Vol. 13. 2000. PP. 77-95, v.a. PP. 85-90 – Fr. CALVO GARZÓN: Connectionist Semantics and the Collateral Information Challenge. *Mind & Language*. Vol. 18. 2003. PP. 77-94, v.a. PP. 80-93.

2076 S. z.B. E. TIFFANY: Semantics San Diego Style. *Journal of Philosophy*. Vol. 96. 1999. PP. 416-29, v.a. PP. 423-28, 429.

2077 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.05.1.

2078 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.07.1.

BACH²⁰⁷⁹, J. SCHRÖDER²⁰⁸⁰, T. ROCKWELL²⁰⁸¹ und vor allem Chr. KRALEMANN²⁰⁸² mit der konnektionistischen Modellierung einer kontextsensitiven Semantik einer natürlichen Sprache auseinandergesetzt.

6.437.4 Eine verstärkte Tendenz, das sog. „Kontextprinzip“ (engl. “context principle”) mit dem sog. „Prinzip der Kompositionalität (der Bedeutung)“ (engl. “principle of compositionality (of meaning)”) ²⁰⁸³ in Einklang zu bringen ²⁰⁸⁴, vor allem was die Bedeutung von komplexen Ausdrücken (engl. “complex expressions”) betrifft, kann in jüngster Zeit in der Linguistik, Philosophie und Psychologie festgestellt werden, u.z., z.B. in Form einer „Kontextsemantik“ (engl. “context semantics”) ²⁰⁸⁵, einer „Prototypsemantik“ (engl. “prototype semantics”) ²⁰⁸⁶ oder eines „semantischen Holismus“ (engl. “semantic holism”) ²⁰⁸⁷.

6.437.5 Eine m.E. sehr überzeugende, auf der komputationalen Neurowissenschaft basierende (philosophische) neurosemantische Theorie (engl. “neurosemantic theory”) ²⁰⁸⁸ entwickelt der kanadische Philosoph und theoretische Neurowissenschaftler Chris ELIASMITH²⁰⁸⁹, wonach, basierend auf dem Ansatz des

2079 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.15.06.1.

2080 S. J. SCHRÖDER: Die Sprache des Denkens. Verlag. Königshausen & Neumann GmbH. Würzburg. 2001. S. 144-58 unter Hinweis auf die Positionen von P. SMOLENSKY, T. van GELDER u.a.

2081 S. z.B. T. ROCKWELL: Attractor Spaces as Modules: A Semi-Eliminative Reduction of Symbolic AI to Dynamic Systems Theory. Minds and Machines. Vol. 15. 2005. PP. 23-55.

2082 S. Bj.Chr. KRALEMANN: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006. S. 72-79, 89-126, v.a. S. 92-97, 97-99, 99-105, S. 162-76 unter Hinweis auf die Positionen von P. CHURCHLAND, Th. GOSCHKE und D. KOPPELBERG, A. CLARK u.a.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.323.

2083 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.322.1.

2084 S. z.B. G. SANDU: Compositionality and the Context Principle. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 262-78, v.a. PP. 268-69.

2085 S. z.B. P. PAGIN: Compositionality and Context. In: G. PREYER / G. PETER (Eds.): Contextualism in Philosophy: Knowledge, Meaning, and Truth. Oxford University Press. 2005 – Fr. RECANATI: Compositionality, Flexibility, and Context Dependence. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 175-91.

2086 S. z.B. J. HAMPTON / M. JÖNSSON: Typicality and Compositionality: The Logic of Combining Vague Concepts. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012 PP. 385-402 – J.J. PRINZ: Regaining Composure: A Defense of Prototype Compositionality. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 437-53.

Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.434.

2087 S. z.B. F.J. PELLETIER: Holism and Compositionality. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 149-74 – P. PAGIN: Meaning Holism. In: E. LEPORE / B. SMITH (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy of Language. Clarendon Press. Oxford. (2006) 2008. PP. 213-32 – P. PAGIN: Is Compositionality Compatible with Holism? Mind and Language. Vol. 12. 1997. PP. 11-33.

2088 S. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. P. 1044.

2089 S. z.B. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. PP. 1035-54, v.a. PP. 1044-48 – Chr. ELIASMITH: How Neurons Mean – A Neurocomputational Theory of Representational Content. Dissertation. Department of Philosophy. Washington University in St. Louis. 2000.

“Neural Engineering Framework (NEF)”, statt des üblichen dreistelligen von einem vierstelligen²⁰⁹⁰ Schema einer Repräsentationsrelation (engl. “four-place schema for the representation relation”)²⁰⁹¹ ausgegangen wird: Ein (1) Vehikel (engl. “vehicle”) im Rahmen eines (4) Systems (engl. “system”) repräsentiert einen (2) Gehalt (engl. “content”) Bezug nehmend auf einen (3) Referenten (engl. “referent”), wobei das vierte Relatum das komplette neuronale System eines biologischen Organismus, zumeist das eines Menschen, bezeichnet und das erste Relatum die darin enthaltenen physischen Objekte wie Neuronen bzw. Neuronenpopulationen, die i.S. von funktionalen Berechnungseinheiten als Träger des repräsentationalen Gehalts aufgefaßt werden können, das dritte Relatum bezieht sich auf diejenigen externen (Energie-)Objekte, z.B. ein Photon, die dazu geeignet sind, eine effektive und effiziente kausale Informationsrelation²⁰⁹² im Rahmen eines Energietransfers zu einem Vehikel, z.B. einem sensorischen Neuron, zu konstituieren, und das zweite Relatum beschreibt die Eigenschaften, die einem externen Objekt von einem neuronalen Aktivitätsmuster einer Neuronenpopulation im Rahmen des Abgleichs des En- und Dekodierungsprozesses zugeschrieben werden kann.²⁰⁹³

v.a. PP. 43-54, 55-67.

Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 5.1.03.

2090 S. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. P. 1044: “However, the metaphor relating mental representation and information does not hold up under scrutiny. In particular, as Dretske (...) has been at pains to point out, there is no such thing as ‘misinformation’ in the same sense as there is ‘misrepresentation.’ That is, information (in the technical sense) is never wrong about anything. Representations, by contrast, can be. This disanalogy is important because it highlights the need to identify a fourth element in the representation relation: the *referent*, that is, the object or event that the content of the representation is supposed to be about. The importance of this element, of course, is something like what Frege wanted to highlight with his distinction between reference and sense (although it is not the same).”

2091 S. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. P. 1044: “A {vehicle} represents a {content} regarding a {referent} with respect to a {system}.”

2092 Diese Relation besteht dabei aus meßbaren Größen im Rahmen des (En- und De-)Kodierungsprozesses in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (engl. “probability distribution”), die den Grad der statistischen Abhängigkeit zwischen der Referentenvariablen und der Vehikelvariablen bestimmen.

S. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. P. 1046, der dazu eine sog. “statistical dependence hypothesis” aufstellt (P. 1047): “The referent of a vehicle is the set of causes that has the highest statistical dependence with the neural responses under all stimulus conditions and does not fall under the computational description.”

2093 S. Chr. ELIASMITH: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): Handbook of Categorization in Cognitive Science. Elsevier. Amsterdam. 2006. P. 1048: “Recall that a neural representation is defined by identifying an encoding and decoding process. Previously, I mentioned that there are methods for finding the representational decoder that allow very good reproduction of the encoded signal. In other words, the decoder tells us how to relate the neural signal to the encoded signal, which means it tells us what properties of the encoded signal are ‘saved’ by the neural signal. This in turn tells us which properties are ascribed to a referent by neural activity.

So content is determined by the decoders. But how are the decoders determined? Simply put, they are found by minimizing the difference (an “error” or “energy”) between the signals being

6.44 Man kann nun i.S. eines Fazits zusammenfassend sagen, daß mit Bezug auf die Diskussion eines integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus in der Sprachkognition, d.h. das Bindungsproblem i.S. einer Variablenbindung betreffend, mit der (Bindungs-)Dynamik in den, m.E. in sehr hohem Grade neurobiologisch plausiblen, (Neuro-)Architekturen des "Neural Engineering Framework (NEF)" nach Chr. ELIASMITH und T.C. STEWART in Verbindung mit den "Holographic Reduced Representations (HRRs)" nach T. PLATE eine – im Rahmen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus – symbolische, kompositionale Neurosemantik erzeugt wird, die, das Problem der Superpositions-katastrophe vermeidend, das Problem der semantischen Kompositionalität auf eine m.E. sehr überzeugende Weise modelliert.

represented and the decoded neural activities over all represented input signals. This tells us that the decoders depend on the relation between two things: (1) the signals to be represented, s ; and (2) the neural activities, or response, r . The response, r , is the activity of a vehicle, and the signals, s , are the referent.

In effect, then, the decoders describe a rule that determines what properties the current neural activities in a population of neurons ascribe to the current referent of the population. That rule is determined by examining the statistical dependence the vehicle has with a referent over all stimulus conditions."

6.5 SKIZZE EINER INTEGRATIVEN THEORIE DER (NEURO-)KOGNITION IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS MIT BEZUG AUF DEN (FORSCHUNGS-)ANSATZ DES EMBODIMENT UND DER EMBODIED COGNITION

Im vorliegenden Kapitel wird im Folgenden kurz skizziert, wie die kognitiven (Neuro-)Architekturen im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus in Hinblick auf eine noch zu entwickelnde integrative Theorie der (Neuro-)Kognition in das neueste Forschungsprogramm im Rahmen der Neuro- und Kognitionswissenschaften, das mit dem Ansatz des sog. "embodiment" bzw. der sog. "embodied cognition" (dt. „verkörperte Kognition“) bezeichnet wird, eingebettet werden kann.

6.51 MINIMALDEFINITION DES EMBODIMENT APPROACH UND DER EMBODIED COGNITIVE SCIENCE IN DER (NEURO-)KOGNITIONSWISSENSCHAFT

Das neueste Forschungsprogramm im Rahmen der Neuro- und Kognitionswissenschaften, das seit Beginn der Mitte der achtziger Jahre des 20. Jhdts. entstanden und mit dem Ansatz des sog. "embodiment"²⁰⁹⁴ bzw. der sog. "embodied cognition" (dt. „verkörperte Kognition“)²⁰⁹⁵ bezeichnet wird, ist dadurch charakterisiert, daß, z.T. basierend auf der nichtlinearen Theorie der dynamischen Systeme sowie der mobilen Robotik²⁰⁹⁶, ein Verständnis dafür gewonnen werden soll, wie Kognition in einem biophysikalischen System, z.B. einem Körper, realisiert bzw. instantiiert werden kann.²⁰⁹⁷ Dabei wird u.a. die prägende Bedeutung der (System-)Umgebungsbedingungen eines biologischen Organismus für die Entwicklung der kognitiven Strukturen, Prozesse und Mechanismen hervorgehoben, insbesondere die Art und Weise, in der sich Geist, Körper und (Lebens-)Welt wechselseitig beeinflussen und interagieren ("Brain-Body-Environment (BBE) interactions")²⁰⁹⁸, um den adaptiven Erfolg des Organismus optimal zu sichern. Dieser Ansatz, der auch als sog. „verhaltensbasierte Künstliche Intelligenz“ (engl. "behaviour based artificial intelligence") bzw. als sog. „verhaltensbasierte (Kognitive) Robotik“ (engl. "behaviour based (cognitive) robotics")²⁰⁹⁹ bezeichnet wird, geht – ebenso wie der (Neo-)Konnektionismus – davon aus, daß Intelligenz am besten „von unten“, d.h. von einfachen sensorischen Bewegungs-, Wahrnehmungs- und Orientierungsleistungen ausgehend, erfaßt werden kann. Darüberhinausgehend aber begnügt sich dieser Ansatz nicht mehr nur mit Computersimulationen, sondern er versucht, z.B. mit der sog. "Subsumption Architecture"²¹⁰⁰ des australischen Informatikers und

-
- 2094 Eingehend s. z.B. T. ZIEMKE: What's that Thing Called Embodiment? In: R. ALTERMAN / D. KIRSH (Eds.): Proceedings of the 25th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. PP. 1134-39 – A. CLARK: An Embodied Cognitive Science? Trends in Cognitive Science. Vol. 3. 1999. PP. 345-51.
Einführend s. z.B. R. CHRISLEY / T. ZIEMKE: Embodiment. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1102-1108, v.a. PP. 1106-1107.
- 2095 Eingehend s. z.B. M. WILSON: Six Views of Embodied Cognition. Psychonomic Bulletin & Review. Vol. 9. No. 4. 2002. PP. 625-36 – M.L. ANDERSON: Embodied Cognition: A Field Guide. Artificial Intelligence. Vol. 149. 2003. PP. 91-130.
Einführend s. z.B. R.A. WILSON / L. FOGLIA: Embodied Cognition. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (July 25, 2011 Edition).
- 2096 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.27.
- 2097 S. R. CHRISLEY / T. ZIEMKE: Embodiment. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. P. 1102.
- 2098 S. z.B. R.D. BEER: Dynamical Approaches to Cognitive Science. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 4. 2000. PP. 91-99.
- 2099 Grundlegend s. z.B. V. BRAITENBERG: Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology. MIT Press. Cambridge/MA. 1984.
Eingehend s. z.B. R.A. BROOKS: Cambrian Intelligence: The Early History of the New AI. The MIT Press. Cambridge/MA. 1999 – R.A. BROOKS: Intelligence without Representation. Artificial Intelligence. Vol. 47. 1991. PP. 139-59.
Einführend s. z.B. M. LENZEN: Natürliche und künstliche Intelligenz. Einführung in die Kognitionswissenschaft. Campus Verlag. Frankfurt/New York. 2002. S. 104-13.
- 2100 S. z.B. R.A. BROOKS: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. IEEE Journal of Robo-

Kognitionswissenschaftlers Rodney A. BROOKS, anhand von mit primitiven Architekturen ausgestatteten mobilen Robotern, die biologische Evolution nachzuspielen, die, wie Menschen, einen „Körper“ haben, deren „Bedürfnisse“ befriedigt sein wollen und sich in mehr oder weniger „natürlichen“ (System-)Umwelten bewegen, die sie durch ihre Sensoren wahrnehmen, und ihr Verhalten an diesen Wahrnehmungen orientieren, d.h. sie erzeugen keine internen Repräsentationen der Außenwelt, die nacheinander abzuarbeiten wären, sondern sie müssen sich in einer sich ständig verändernden (System-)Umgebung in Echtzeit zurechtfinden.

6.52 POSITIONEN IN DER EMBODIED COGNITION

Im vorliegenden Kapitel werden im Folgenden zwei der wichtigsten Positionen in der "Embodied Cognition" vorgestellt, u.z. die "resonant cell assemblies" i.S. Fr.J. VARELA's und sein, zusammen mit E. THOMPSON verretener Ansatz der "neurophenomenological perspective", sowie die "(modal) Theory of Perceptual Symbol Systems (PSS)" nach L.W. BARSALOU.

6.52.01 RESONANT CELL ASSEMBLIES UND NEUROPHENOMENOLOGICAL PERSPECTIVE NACH Fr.J. VARELA

6.52.01.1 Mit seinem Ansatz der sog. "resonant cell assemblies"²¹⁰¹ entwickelt der chilenische (Neuro-)Biologe Francisco J. VARELA²¹⁰² ein neuromentales Modell, wonach jedem (neuro-)kognitiven Prozeß bzw. Akt (engl. "cognitive act"), basierend auf der sog. „(Synchronizitäts-)Bindungshypothese“ (engl. "Binding-By-Synchrony (BBS) Hypothesis")²¹⁰³, schnelle Gamma-Band²¹⁰⁴ phasensynchrone²¹⁰⁵ Oszillationen (engl. "fast (gamma band) phase synchrony")²¹⁰⁶ von weit verteilten Zellverbänden (engl. "widely distributed Cell Assemblies (CAs)")²¹⁰⁷ zu Grunde liegen (engl. "large-scale

-
- 2101 Grundlegend s. z.B. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. Biological Research. Vol. 28. 1995. PP. 81-95.
Eingehend s. z.B. E. RODRIGUEZ / N. GEORGE / J.-Ph. LACHAUX / J. MARTINERIE / B. RENAULT / Fr.J. VARELA: Perception's Shadow: Long-Distance Synchronization of Human Brain Activity. Nature. Vol. 397. 1999. PP. 430-33 – Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Neuroscience. Vol. 2. 2001. PP. 229-37.
Einführend s. z.B. Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. PP. 95-108 – O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press, Cambridge/MA, London. 2011. P. 255.
- 2102 S. Kap. 1.25.05.
- 2103 S. z.B. S. NEUENSCHWANDER / A.K. ENGEL / P. KÖNIG / W. SINGER / F.J. VARELA: Synchronization of Neuronal Responses in the Optic Tectum of Awake Pigeons. Visual Neuroscience. Vol. 13. 1996. PP. 575-84.
S. auch die Ausführungen in Kap. 3.34, 3.4.
- 2104 In neueren Publikationen wird von Phasensynchronizitäten über mehrere Frequenzbänder hinweg berichtet.
S. einführend z.B. Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Neuroscience. Vol. 2. 2001. P. 236.
- 2105 S. hierzu im einzelnen z.B. Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Neuroscience. Vol. 2. 2001. PP. 229-31.
S. auch die Ausführungen in Kap. 3.424.04.
- 2106 S. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. Biological Research. Vol. 28. 1995. PP. 83-84, P. 82: "*Hypothesis II: A specific CA is selected through the fast, transient phase locking of activated neurons belonging to sub-threshold competing CAs.*"
S. auch Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. P. 97.
- 2107 S. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. Biological Research. Vol. 28. 1995. P. 81: "*Definition: A Cell Assembly (CA) is a distributed subset of neurons with strong reciprocal connections.*"
S. auch Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. PP. 95-97.
S. auch die Ausführungen in Kap. 3.243, Fn. 47 und Kap. 3.240, Fn. 31.

integration²¹⁰⁸)²¹⁰⁹, sodaß das neurale Korrelat dieser mentalen bzw. kognitiven Akte in einem topologisch-transienten Hypergraphen (engl. "hypergraph")²¹¹⁰ besteht, der, nachdem er einen Selektionsprozeß im Rahmen von Resonanzkriterien²¹¹¹ durchlaufen hat, während eines hinreichenden Zeitintervalls von ca. 500 Millisekunden über einen integrativen (Synchronisations-)Mechanismus eine relativ-stabile und dominante neurale distribuierte (Prozeß-)Struktur generiert, die als das Resultat einer kohärenten „Interpretation“ (engl. "interpretation")²¹¹² von zuerst konkurrierenden Zellverbänden einem einheitlichen (bewußten)²¹¹³ mental-kognitiven Moment zu Grunde liegt.²¹¹⁴

6.52.01.2 Daran anschließend vertritt Fr.J. VARELA, zusammen mit dem kanadischen Philosophen und Kognitionswissenschaftler Evan THOMPSON²¹¹⁵, eine neurophänomenologische Perspektive (engl. "neurophenomenological perspective")²¹¹⁶, basierend auf dem (Forschungs-)Ansatz i.S. des

2108 S. Fr.J. VARELA / J.P. LACHAUX / E. RODRIGUEZ / J. MARTINERIE: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 2001. PP. 231-36.

2109 S. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. *Biological Research*. Vol. 28. 1995. P. 82: "*Hypothesis I: A singular, specific cell assembly underlies the emergence and operation of every cognitive act.*"

S. auch Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. P. 97.

2110 S. z.B. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. *Biological Research*. Vol. 28. 1995. P. 91 – Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. P. 101.

2111 S. auch die Ausführungen in Kap. 4.4.02.

2112 S. hierzu z.B. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. *Biological Research*. Vol. 28. 1995. P. 91: "(...) the generation of a mental-cognitive state corresponds to the constitution of an assembly which incorporates or discards into its coherent components other concurrent neural activity generated exogenously or endogenously (...). In other words, the synchronous glue provides the reference point from which the inevitable multiplicity of concurrent potential assemblies is evaluated until one is transiently stabilized and expressed behaviorally. This is a form of neural hermeneutics since the neural activity is 'seen' or 'evaluated' from the point of view of the cell assembly that is most dominant at the time. Dynamically this entire process takes the form of a bifurcation from a noisy background to conform a transiently stable, distributed structure bound by synchrony."

S. auch Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. PP. 100-101.

2113 S. hierzu z.B. Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. *Biological Research*. Vol. 28. 1995. P. 91.

2114 S. hierzu Fr.J. VARELA: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. *Biological Research*. Vol. 28. 1995. PP. 90-91: "*Core Hypothesis: Mental-cognitive states are interpretations of current neural activity, carried out in reference to a transient coherency-generating process generated by that nervous system.*"

S. auch Fr.J. VARELA: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. PP. 100-103, v.a. P. 100.

2115 Zur Person Evan THOMPSON's siehe die Website <http://philosophy.utoronto.ca/people/faculty/evan-thompson>.

2116 Eingehend s. z.B. Fr.J. VARELA / E. THOMPSON: Neural Synchrony and the Unity of Mind: A

“enactive approach”²¹¹⁷ bzw. des “(radical) embodiment approach”²¹¹⁸, die die Mittel bereitstellt “for criss-crossing the so-called ‘explanatory gap’ between first-person phenomenology and third-person neuroscience.”²¹¹⁹

Neurophenomenological Perspective. In: A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003. PP. 266-87 – E. THOMPSON / Fr.J. VARELA: *Radical Embodiment: Neural Dynamics and Consciousness*. *Trends in Cognitive Science*. Vol. 5. 2001. PP. 418-25 – Fr.J. VARELA: *Neurophenomenology: A Methodological Remedy for the Hard Problem*. *Journal of Consciousness Studies*. Vol. 4. 1996. PP. 330-49.

S. auch Fr.J. VARELA: *The Specious Present: A New Neurophenomenology of Time Consciousness*. In: J. PETITOT / Fr.J. VARELA / J.-M. ROY / B. PACHOUD (Eds.): *Naturalizing Phenomenology*. Stanford University Press. Stanford/CA. 1999. PP. 266-314.

2117 S. hierzu z.B. Fr.J. VARELA / E. THOMPSON / E. ROSCH: *The Embodied Mind – Cognitive Science and Human Experience*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1992.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.51.

2118 S. z.B. Fr.J. VARELA / E. THOMPSON / E. ROSCH: *The Embodied Mind – Cognitive Science and Human Experience*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1992 – E. THOMPSON / Fr.J. VARELA: *Radical Embodiment: Neural Dynamics and Consciousness*. *Trends in Cognitive Science*. Vol. 5. 2001. P. 418.

S. hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.51.

2119 S. Fr.J. VARELA / E. THOMPSON: *Neural Synchrony and the Unity of Mind: A Neurophenomenological Perspective*. In: A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003. PP. 267-68.

6.52.02 (MODAL) THEORY OF PERCEPTUAL SYMBOL SYSTEM (PSS) NACH L.W. BARSALOU

6.52.02.0 Die sog. „(modale) Theorie der perzeptuellen Symbolsysteme“ (engl. “(modal) Theory of Perceptual Symbol Systems (PSS)”) ²¹²⁰ des U.S.-amerikanischen Psychologen und Kognitionswissenschaftlers Lawrence W. BARSALOU ²¹²¹ stellt einen Ansatz einer funktionellen Architektur dar, der beschreibt, wie das menschliche Gehirn die Eigenschaften eines konzeptuellen Systems über ein analoges Aufzeichnungssystem (engl. “recording system”) ²¹²² anhand von sensormotorischen Mechanismen integriert und implementiert.

6.52.02.1 Im Gegensatz zur Klassischen Symboltheorie ²¹²³, wonach die Kognition und die internen mentalen Repräsentationen nicht-perzeptuell, d.h. „amodal“ (engl. “amodal”) ²¹²⁴ sind, d.h. es besteht keine systematische morphologische Korrespondenzrelation zwischen einem Perzept und einem Symbol ²¹²⁵, entwickelt L.W. BARSALOU mit seiner Theorie der Perzeptuellen Symbolsysteme eine verkörperte Theorie der Kognition (engl. “embodied theory of cognition”) ²¹²⁶, wonach ein Wahrnehmungszustand in ein analoges Repräsentationssystem überführt wird, das inhärent perzeptuell arbei-

2120 Grundlegend s. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 577-609.

Eingehend s. z.B. J. PRINZ / L.W. BARSALOU: Acquisition and Productivity in Perceptual Symbol Systems. An Account of Mundane Creativity. In: T. DARTNALL (Ed.): Creativity, Cognition, and Knowledge. Praeger. Westport/CT. 2002. PP. 105-38 – L.W. BARSALOU: Grounding Symbolic Operations in the Brain's Modal Systems. In: G.R. SEMIN / E.R. SMITH (Eds.): Embodied Grounding: Social, Cognitive, Affective, and Neuroscientific Approaches. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 9-42 – L.W. BARSALOU: Grounded Cognition. Annual Review of Psychology. Vol. 59. 2008. PP. 617-45.

S. auch L.W. BARSALOU: The Instability of Graded Structure: Implications for the Nature of Concepts. In: U. NEISSER (Ed.): Concepts and Conceptual Development: Ecological and Intellectual Factors in Categorization. Cambridge Univ. Press. Cambridge/UK. 1987. PP. 101-40 – L.W. BARSALOU: Frames, Concepts, and Conceptual Fields. In: A. LEHRER / E.F. KITTAY (Eds.): Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Lexical and Semantic Organization. Erlbaum. Hillsdale/NY. 1992. PP. 21-74.

Einführend s. z.B. W. BECHTEL: Representations: From Neural Systems to Cognitive Science. In: W. BECHTEL / P. MANDIK / J. MUNDALÉ / R. S. STUFFLEBEAM (Eds.): Philosophy and the Neurosciences: A Reader. Basil Blackwell. Oxford. 2001. PP. 343-46 – M.C. TACCA: Seeing Objects: The Structure of Visual Representation. Mentis. Paderborn. 2010. PP. 46-47.

2121 Zur Person Lawrence W. BARSALOU's siehe die Website <http://psychology.emory.edu/cognition/barsalou/index.html>.

2122 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 581-82.

2123 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.1.

2124 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 577, 578-80.

2125 S. D.W. JOYCE / L.V. RICHARDS / A. CANGELOSI / K.R. COVERNTRY: On the Foundations of Perceptual Symbol Systems: Specifying Embodied Representations via Connectionism. Proceedings of the 5th International Conference on Cognitive Modeling: The Logic of Cognitive Systems (ICCM). Bamberg, Germany. April, 9-12, 2003. Universitäts-Verlag. 2003. PP. 147-53.

2126 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.51.

tet, d.h. in den (konnektionistischen) neuronalen Netzwerken des perzeptuellen Gedächtnisses werden während des Wahrnehmungsvorgangs sog. „perzeptuelle Symbole“ (engl. “perceptual symbols”)²¹²⁷ erzeugt, deren interne Struktur „modal“ (engl. “modal”)²¹²⁸ ist, d.h. die interne kognitive Repräsentation wird über einen systematischen Transformationsprozeß mit der kodierten sensorischen Information identifiziert, sodaß dadurch das fundamentale sog. „Problem der Grundlegung eines Symbols“ (engl. “Symbol Grounding Problem”)²¹²⁹ gelöst werden würde.²¹³⁰

6.52.02.2 Das Repräsentationsformat dieser perzeptuellen Symbole i.S. L.W. BARSALOU's besteht dabei in einem multimodalen Schema (engl. “frame”)²¹³¹, wobei eine Sache, z.B. ein Kraftfahrzeug, oder ein Sachverhalt, z.B. das Lenken eines Kraftfahrzeugs, derart im (Langzeit-)Gedächtnis als ein ((neuro-)mentales) Konzept i.w.S.²¹³² abgespeichert wird, daß es sich nicht einfach um eine bloße Aufzeichnung (engl. “recording”) von Eigenschaften dieser Sache oder dieses Sachverhalts handelt, sondern um eine relationale perzeptuelle Struktur, bestehend aus einer selektiven Kombination bzw. Konfiguration aus den relevanten sensorischen Aktivitätsmustern, d.h. den einzelnen (Wahrnehmungs-)Instanzen (engl. “tokens”) einer Sache, z.B. die Gesamtheit der gewichteten Wahrnehmungseindrücke all der Kraftfahrzeuge, die man irgendwann einmal in der Vergangenheit gewonnen hat, sodaß ein sog. „(statistischer) (Proto-)Typ“ (engl. “(statistical) (proto-)type”)²¹³³ erzeugt wird, z.B. der Typ 'Kraftfahrzeug', der formal als ein sog. „Cluster“²¹³⁴ bzw. als ein sog. „(dynamischer) Attraktor“ (engl. “attractor”)²¹³⁵ in einem konnektionistischen Netzwerk aufgefaßt werden kann, m.a.W., es handelt sich bei einem Schema um einen generativen und dynamischen Mechanismus, der eine Menge von perzeptuellen Symbolinstanzen mit Hilfe der selektiven Aufmerksamkeit (engl. “selective attention”) zu einem einheitlichen ((neuro-)mental)en Konzept i.w.S. integriert.²¹³⁶

2127 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 577-78, 582.

2128 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 577-78.

2129 Zum sog. „Problem der Grundlegung eines Symbols“ (engl. “Symbol Grounding Problem”) s. z.B. St. HARNAD: The Symbol Grounding Problem. Physica. D42. 1990. PP. 335-46 – D.J. CHALMERS: Subsymbolic Computation and the Chinese Room. In: J. DINSMORE (Ed.): The Symbolic and Connectionist Paradigms: Closing the Gap. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale/NJ. 1992 PP. 25-48.

2130 S. z.B. L.W. BARSALOU: Grounded Cognition. Annual Review of Psychology. Vol. 59. 2008. PP. 617-45 – L.W. BARSALOU: Grounding Symbolic Operations in the Brain's Modal Systems. In: G.R. SEMIN / E.R. SMITH (Eds.): Embodied Grounding: Social, Cognitive, Affective, and Neuroscientific Approaches. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 9-42.

2131 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 582, 590-92.

2132 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.20.

2133 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.4.02.

2134 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 4.21.

2135 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen in Kap. 1.22, 4.25, 5.2.

2136 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 583-84, 585-86 – W.K. SIMMONS / L.W. BARSALOU: The Similarity-in-Topography Principle:

Die perzeptuellen Symbole werden dabei im Gedächtnis in einem sog. „Simulator“ (engl. „simulator“)²¹³⁷ organisiert, der aus zwei Komponenten besteht, zum einen, aus dem bereits erläuterten, im Rahmen eines bottom-up Verarbeitungsprozesses generierten Schema, und, zum anderen, aus den daraus im Rahmen eines top-down Verarbeitungsprozesses konstruierten Simulationsprozessen, die – i.S. eines ((neuro-)mental)en Konzepts i.w.S. – eine kohärente sog. „Simulation“ (engl. „simulation“)²¹³⁸ eines bereits im Gedächtnis integrierten (Proto-)Typs einer Sache oder eines Sachverhalts erzeugen.²¹³⁹ Indem man also ein ((neuro-)mentales) Konzept i.w.S. als einen Simulator auffaßt, implementiert ein modales perzeptuelles Symbolsystem – im Prinzip – ein basales konzeptuelles System (engl. „basic conceptual system“)²¹⁴⁰ mit der Kompetenz zur potentiell infiniten (Re-)Kombination bzw. (Re-)Konfiguration von schematischen perzeptuellen Symbolkomponenten i.S. der Produktivität, Systematizität, Kompositionalität und der logischen Inferenz²¹⁴¹, wobei die entscheidenden Vorzüge eines modalen Symbolsystems nach L.W. BARSALOU dessen (neuro-)biologische Plausibilität sei, d.h. dessen zahlreiche empirisch-experimentellen Belege aus den kognitiven Neurowissenschaften – im Gegensatz zu amodalen Symbolsystemen, und die optimale Kontextsensitivität der repräsentationalen Konzepte.²¹⁴²

6.52.02.3 Dieses modale perzeptuelle Symbolsystem ist nun von L.W. BARSALOU, zusammen mit dem U.S.-amerikanischen kognitiven Psychologen William Kyle SIMMONS²¹⁴³, zu der sog. „Conceptual Topography Theory (CTT)“²¹⁴⁴ und zu der sog. „Language and Situated Simulation (LASS) Theory“²¹⁴⁵ weiterentwickelt worden.

Reconciling Theories of Conceptual Deficits. Cognitive Neuropsychology. Vol. 20. 2003. PP. 451-86.

2137 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 582, 586.

2138 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. P. 586.

2139 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 587-88.

2140 S. z.B. L.W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 582, 592.

2141 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 2.14.

2142 S. z.B. L. W. BARSALOU: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 584, 591-92 – L.W. BARSALOU / W.K. SIMMONS / A.K. BARBEY / Chr.D. WILSON: Grounding Conceptual Knowledge in Modality-Specific Systems. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 7. 2003. PP. 84-91.

S. auch Fr. PULVERMÜLLER: Word's in the Brain's Language. Behavioral and Brain Science. Vol. 22. 1999. PP. 253-70.

2143 Zur Person W. Kyle SIMMONS's siehe die Website <http://www.laureateinstitute.org/faculty.asp?id=8&q=&task=staffdisplay&staffid=57>.

2144 Grundlegend s. z.B. W.K. SIMMONS / L.W. BARSALOU: The Similarity-in-Topography Principle: Reconciling Theories of Conceptual Deficits. Cognitive Neuropsychology. Vol. 20. 2003. PP. 451-86. Eingehend s. z.B. L.W. BARSALOU / W.K. SIMMONS / A.K. BARBEY / Chr.D. WILSON: Grounding Conceptual Knowledge in Modality-Specific Systems. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 7. 2003. PP. 84-91.

2145 Grundlegend s. z.B. L.W. BARSALOU / A. SANTOS / W.K. SIMMONS / Chr.D. WILSON: Language and Simulation in Conceptual Processing. In: M. de VEGA / A.M. GLENBERG / A.C. GRAESSER

6.53 DISKUSSION DER INTEGRATIVEN (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS MIT BEZUG AUF EINE INTEGRATIVE THEORIE IM SINNE DER EMBODIED, SITUATED UND SOCIAL COGNITION

6.530 Seit spätestens dem Beginn der neunziger Jahre des 20. Jhdts ist nun mehrfach versucht worden, eine Brücke zu schlagen zwischen dem Ansatz der Dynamischen Systemtheorie und des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus und dem des sog. "embodiment" bzw. vor allem der sog. "embodied cognition":

6.531 Wie bereits erwähnt²¹⁴⁶, von seiten der "behaviour based artificial intelligence", insbesondere in Gestalt von R.A. BROOKS mit seinen mobilen Robotern.

6.532 Ferner, ebenfalls schon angesprochen²¹⁴⁷, über den "Dynamic Systems Approach" i.S. von E. THELEN und L.B. SMITH und den daran anknüpfenden "Dynamic Field Approach" i.S. von J.P. SPENCER und Gr. SCHÖNER.

6.533 Weiterhin von großer Bedeutung war die schon dargelegte²¹⁴⁸ Position des "(radical) embodiment approach" nach Fr.J. VARELA, E. THOMPSON und E. ROSCH.

6.534 Auch von seiten einer bereits erwähnten²¹⁴⁹ "Developmental Robotics" i.S. M. SCHLESINGER's in der Entwicklungspsychologie gehen Anregungen aus anhand von autonomen Agenten entwicklungspsychologische Prozesse zu simulieren.

6.535 Abschließend zu erwähnen wäre in jüngster Zeit auch der Versuch, die Prinzipien aus der Nichtgleichgewichtsdynamik in der Physik, wie sie in der Synergetik nach H. HAKEN²¹⁵⁰ grundgelegt worden sind, in Zusammenarbeit mit W. TSCHACHER auf die "embodied cognition" zu transferieren, wobei man das selbstorganisierte Verhalten von virtuellen Agenten in einer möglichst realistischen (System-)Umgebung untersucht.²¹⁵¹

2146 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.51.

2147 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.27.2.

2148 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.52.01.

2149 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.27.3.

2150 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 1.25.02.

2151 S. z.B. H. HAKEN / W. TSCHACHER: The Transfer of Principles of Non-Equilibrium Physics to Embodied Cognition. In: W. TSCHACHER / C. BERGOMI (Eds.): The Implications of Embodiment: Cognition and Communication. Imprint Academic. Exeter. 2011. PP. 75-88 – H. HAKEN / W. TSCHACHER: A Theoretical Model of Intentionality with an Application to Neural Dynamics. Mind and Matter. Vol. 8. 2010. PP. 7-18 – H. HAKEN / W. TSCHACHER: Intentionality in Non-Equilibrium Systems? The Functional Aspects of Self-Organized Pattern Formation. New Ideas in Psychology. Vol. 25. 2007. PP. 1-15 – W. TSCHACHER / J.-P. DAUWALDER / H. HAKEN: Self-Organizing Systems Show Apparent Intentionality. In: W. TSCHACHER / J.-P. DAUWALDER (Eds.): The Dynamical Systems Approach to Cognition. World Scientific. Singapore. 2003. PP. 183-200.

6.54 DISKUSSION DER INTEGRATIVEN (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS MIT BEZUG AUF DEN REPRÄSENTATIONALISMUS IN DER (NEURO-)KOGNITIONSWISSENSCHAFT

6.540 Die Flüchtigkeit der vektoriellen Berechnungsprozesse der prozessualen integrativen (Lern- und Bindungs-)Mechanismen, die anhand von transienten dynamischen Vektorflüssen bzw. Vektorströmen²¹⁵² modelliert werden kann, wirft die Frage auf, ob und inwieweit diese Konstruktionen überhaupt noch den Charakter einer internen Repräsentation im traditionellen Sinn besitzen, angesichts der Transientendynamik i.S. einer „fluiden Architektur“ (engl. “fluid architectures”) nach R.L. CHRISLEY²¹⁵³, die eine Vielzahl der dargestellten kognitiven (Neuro-)Architekturen aufweisen, was vor allem von W. MAASS (Kap. 5.4.01) und von Fr. PASEMANN (Kap. 5.2.04) herausgearbeitet worden ist.

6.541 Im Rahmen der Debatte um den Begriff der internen ((neuro-)mentalen) Repräsentation in den theoretischen Modellen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus stellen, z.B. nach i.S. K. VOGLEY und A. BARTELS²¹⁵⁴, deren integrative (Prozeß-)Mechanismen nicht nur eine kausal-korrelative, sondern auch eine komputational-funktionale und emulative Repräsentationsform dar: Den kausal-korrelativen Begriff der Repräsentation erweiternd, wonach eine (Prozeß-)Aktivität eines neurokognitiven Systems S dann als repräsentational betrachtet wird, m.a.W. dieser Aktivität ein repräsentationaler Gehalt zugesprochen wird, wenn sie im Rahmen einer kausal-korrelativen Analyse Informationen über die sie verursachenden externen Prozesse, d.h., Gegenstände, Zustände und Ereignisse, enthält, wird mit W. BECHTEL²¹⁵⁵, mit Hinweis auf die „(modale) Theorie der perzeptuellen Symbolsysteme“ nach L.W. BARSALOU²¹⁵⁶, und R. GRUSH²¹⁵⁷ zudem die komputationale Funktion miteinbezogen, die die Information für ein neurokognitives System besitzt, das diese Information bereitstellt, erzeugt bzw. „präsentiert“, und dann in späteren Phasen eines mehrstufigen neurokognitiven Informationsverarbeitungsprozesses, z.B. im Rahmen der Handlungsplanung, von diesen früher erzeugten Informationen anhand von integrativen (Prozeß-)Mechanismen „Gebrauch“ macht. Dieser komputational-funktionale Begriff der Repräsentation wird schließlich

2152 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 1.221.

2153 In Anlehnung an R.L. CHRISLEY: Fluid Architecture: Connectionist Systematicity. 2000 From: <http://www.cogs.susx.ac.uk/users/ronc/fluid.ps>.

S. auch J.L. McCLELLAND / D.E. RUMELHART / G.E. HINTON: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. P. 3.

2154 S. K. VOGLEY / A. BARTELS: Repräsentation in den Neurowissenschaften. In: H.J. SANDKÜHLER (Hrsg.): Theorien und Begriffe der Repräsentation. Schriftenreihe der von der VolkswagenStiftung geförderten Forschungsgruppe Repräsentation. Bd. 1. Bremen. 2006. S. 99-113.

2155 S. z.B. W. BECHTEL: Representations: From Neural Systems to Cognitive Science. In: W. BECHTEL / P. MANDIK / J. MUNDALÉ / R. S. STUFFLEBEAM (Eds.): Philosophy and the Neurosciences: A Reader. Basil Blackwell. Oxford. 2001. PP. 332-48.

2156 Siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 6.52.02.

2157 S. Fn. 2158.

mit R. GRUSH²¹⁵⁸ im Rahmen seiner sog. „Emulationstheorie der Repräsentation“ (engl. “Emulation Theory of Representation (ETR)”) noch pointierter herausgearbeitet, wonach – im Gegensatz zu einer im Wahrnehmungsprozeß bloß bereitgestellten perzeptuellen Information, eine sog. Präsentation (engl. “presentation”) – sich eine Repräsentation gerade durch die notwendige Bedingung auszeichnet, daß sie über ein sog. „Kontrollsystem“ (engl. “controller”) verfügt, das, ohne die direkte und kausale Verbindung zu den Umweltzuständen, die vorweggenommenen möglichen Handlungsziele des neokognitiven Systems anhand von sog. „Emulatoren“ (engl. “emulator”) simuliert, und die betreffenden sich daraus ergebenden Informationen dem Kontrollsystem zur Verfügung stellt.

6.542 Deshalb sei der herkömmliche Begriff einer (mentalen) Repräsentation z.B. nach den chilenischen (Neuro-)Biologen und Philosophen Humberto R. MATURANA²¹⁵⁹ und Francisco J. VARELA²¹⁶⁰ durch den der „strukturellen Koppelung“ (engl. “structural coupling”) zu ersetzen, sodaß eine (An-)Passung des Verhaltens nicht anhand einer Rezeption von Umweltinformationen erfolgt, sondern anhand einer systemimmanenten Produktion von Information aus externen Störeinwirkungen, wobei sich die (Prozeß-)Struktur dieses Konstruktionsprozesses aus zahlreichen System-Umwelt-Interaktionen derart „eingespielt“ hat, daß sie sich als hinreichend „kongruent“ mit der Struktur des Mediums erweist, sodaß man damit einen „generativen (Selektions-)Mechanismus“ angeben könne.

2158 S. grundlegend z.B. R. GRUSH: The Emulation Theory of Representation: Motor Control, Imagery, and Perception. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 27. 2004. PP. 377-442.

2159 H. MATURANA: Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie. Vieweg Verl. Braunschweig, Wiesbaden. 1982 S. 15-24.

2160 H. MATURANA / Fr.J. VARELA: Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens. Scherz. München. 1987.

7. EVALUATION, KRITIK UND FAZIT: KONNEKTIONISTISCHE (NEURO-)KOGNITION, STOCHASTISCHE SELBSTORGANISIERTE (NEURO-)KOGNITIVE (SYSTEM-)DYNAMIK UND INTEGRATIVE (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN AUF DER BASIS EINER SYSTEMTHEORETISCHEN VEKTORIELLEN FORM

In den folgenden Kapiteln der vorliegenden Arbeit erfolgt nun eine zusammenfassende Evaluation sowie einige kritische Anmerkungen (Kap. 7.1) und ein abschließendes Fazit (Kap. 7.2) vor allem in Bezug auf die Analyse der kognitiven (Neuro-)Architekturen des systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus.

7.1 EVALUATION UND KRITIK DER (NEURO-)ARCHITEKTUREN IM SYSTEMTHEORETISCHEN (NEO-)KONNEKTIONISMUS MIT IHREN INTEGRATIVEN (SYNCHRONISATIONS-)MECHANISMEN

7.10 In diesem Kapitel wird nun eine zusammenfassende Bewertung derjenigen kognitiven (Neuro-)Architekturen im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus vorgenommen, die m.E. das Bindungsproblem im Rahmen eines integrativen dynamischen Mechanismus am überzeugendsten gelöst haben:

7.11 Mit Bezug auf die Diskussion eines integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus in der Wahrnehmungskognition, d.h. das Bindungsproblem i.S. einer Eigenschaftsbindung betreffend, wird mit der (Bindungs-)Dynamik in der kognitiven (Neuro-)Architektur der "Oscillatory Networks" nach M. WERNING (Kap. 5.3.01) eine – im Rahmen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus – emulative kompositionale Neurosemantik für eine monadische Prädikatensprache erster Ordnung erzeugt, die, das Problem der Superpositionskatastrophe vermeidend, das Problem der semantischen Kompositionalität mit einem sehr hohen Grad an neurobiologischer Plausibilität und auf eine m.E. sehr überzeugende Weise modelliert: Das mathematisch-logische Modell der Oszillatorischen Netzwerke im allgemeinen und eng angelehnt an die empirischen Daten aus der Neurobiologie und Neurophysiologie beschreibt, wie – in der Zeit – anhand von neuronalen kortikalen Strukturelementen eine interne kompositionale Repräsentation erzeugt wird, bezogen auf einen bestimmten visuellen Wahrnehmungssachverhalt, sodaß die Bezugnahme eines sprachlichen Ausdrucks im Rahmen einer monadischen Prädikatensprache erster Ordnung mit Identität auf einen äußeren Sachverhalt in der Welt, gegeben anhand der Informationen im jeweiligen rezeptiven Feld, gewährleistet wird. Dies hat zur Konsequenz, daß dadurch beschrieben werden kann, wie einem bestimmten neuronalen temporalen (Synchronisations-)Prozeß ein Bedeutungsgehalt zugesprochen werden kann, der – im Rahmen eines (visuellen) Wahrnehmungsvorgangs – einem sprachlichen Ausdruck einen wahrgenommenen (Prädikations-)Sachverhalt zuordnet, was somit von M. WERNING als neuronale Extension bezeichnet wird. Dies impliziert damit eine isomorphe Transformation von diskreten Symbolstrukturen dieser Prädikatensprache erster Ordnung und ihren Denotationen in kontinuierliche Oszillation(-sfunktion-)en der Neuronen des Oszillatorischen Netzwerks, da diese neuronalen Strukturelemente im Sinne eines Isomorphismus kovariieren mit den externen (Informations-)Gehalten des physikalischen perzeptiven Stimulus, die identisch sind mit der Standardmodelltheoretischen Struktur der Denotationen der Ausdrücke dieser (Prädikaten-)Sprache, sodaß ein Oszillatorisches Netzwerk mit seiner neuronalen Oszillations(-funktions-) bzw. Eigenmoden-Struktur damit eine nicht-symbolische algebraische Emulation dessen erzeugt, was es im Rahmen seiner Perzeption, basierend auf dem Konzept des rezeptiven Feldes, repräsentiert.

Das (Simulations-)Modell repräsentiert demnach eine dynamische Momentaufnahme einer einzelnen visuellen Szene im Arbeitsgedächtnis mit der Konstitution von mindestens zwei verschiedenen Objekten, z.B. einem vertikalen roten Balken und einem horizontalen grünen Balken. Was jedoch ergänzend

zu modellieren wäre, ist die Repräsentation einer Abfolge von einzelnen Momentaufnahmen im Rahmen der Abspeicherung in einem Langzeitgedächtnis, m.E. am besten im Wege einer Verbindung mit dem "Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)" nach T. KOHONEN (Kap. 4.4.01) oder mit der "Adaptive Resonance Theory (ART)" nach St. GROSSBERG und G. CARPENTER (Kap. 4.4.02), sodaß (semantische) Konzepte i.S. von statistischen Prototypen erzeugt werden könnten. Demgegenüber überzeugt diese in hohem Maße neurobiologisch plausible kognitive (Neuro-)Architektur aber mit einem selbstorganisiert funktionierenden dynamischen Synchronisationsmechanismus – im Vergleich z.B. zu dem traditionellen (statischen) (Bindungs-)Mechanismus der „konjunktiven Kodierung“, die in manchen der konkurrierenden Modelle angewendet werden.

7.12 Mit Bezug auf die Diskussion eines integrativen, dynamischen (Synchronisations-)Mechanismus in der Sprachkognition, d.h. das Bindungsproblem i.S. einer Variablenbindung betreffend, wird mit der (Bindungs-)Dynamik in den, m.E. in sehr hohem Grade neurobiologisch plausiblen, kognitiven (Neuro-)Architekturen des "Neural Engineering Framework (NEF)" nach Chr. ELIASMITH und T.C. STEWART (Kap. 5.1.03) in Verbindung mit den "Holographic Reduced Representations (HRRs)" nach T. PLATE (Kap. 5.1.02) eine – im Rahmen des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus – symbolische, kompositionale Neurosemantik erzeugt wird, die, das Problem der Superpositionskatastrophe vermeidend, das Problem der semantischen Kompositionalität auf eine m.E. sehr überzeugende Weise modelliert, wobei auch die Beschränkungen der mathematischen Konzeption der "Tensor Product Representation" P. SMOLENSKY's (Kap. 5.1.01), vor allem was die Konstruktion von rekursiven Strukturen betrifft, überwunden werden. M.E. zu kritisieren wäre allenfalls die indifferente Position der Autoren, ob und inwieweit im Rahmen der integrativen Kompositionsmechanismen von Aktivitätsvektoren das Prinzip der zeitlichen Synchronisation von neuronalen Signalen angewendet werden müßte. Demgegenüber spricht für diese kognitive (Neuro-)Architektur, wie bereits erwähnt, ihre – im Vergleich zu den Architekturen des „strukturierten Konnektionismus“ oder des „hybriden Konnektionismus“ – ungemein hohe neurophysiologische Plausibilität i.S. einer realistischen Modellkonstruktion gemäß der 3. Modellgeneration der "Spiking Neural Networks (SNN)".

Was das „Problem der multiplen Instantiierung“ und dessen überzeugende Lösung anhand einer Periodenverdopplung der Oszillationsfrequenz des betreffenden Assemblies betrifft, ist die kognitive (Neuro-)Architektur des "INFERNET" nach J.P. SOUGNÉ (Kap. 5.1.06) noch zu erwähnen.

7.13 Mit Hinblick auf die in der medizinischen Neuroanatomie und Neurophysiologie hinreichend belegte, in weiten Bereichen grundlegend modulare Struktur des neurokognitiven Systems des Menschen und der damit zusammenhängenden Berücksichtigung einer fokal-selektiven Aufmerksamkeitskomponente im phänomenalen (Selbst-)Bewußtseinerleben des Menschen im Rahmen des Bindungsproblems, vor allem was das Problem der intermodalen und sensomotorischen Integrationsleistungen betrifft, verbleibt allerdings noch immenser Forschungsbedarf.

7.14 Dies gilt erst recht in Bezug auf noch umfassendere neuromentale Integra-

tionsleistungen des Menschen i.S. einer „embodied cognition“, „emotional cognition“ oder einer „social cognition“ unter Einbeziehung des gesamten emotional-motivational-sozialen Aspekts einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition, was in der vorliegenden Arbeit nur im Ansatz angesprochen werden konnte.

7.2 FAZIT: POSITION DES AUTORS

7.20 Mit dem Aufkommen der „Theorie der nichtlinearen Dynamischen Systeme“ (engl. “non-linear Dynamical Systems Theory” (DST)) (Kap. 1.2) in der Kognitionswissenschaft (engl. “cognitive science”) (Kap. 1.1) in der zweiten Hälfte des 20. Jhdt.'s, die – im Gegensatz zum dominanten Paradigma der Klassischen Symboltheorie (engl. “classical symbol theory”) (Kap. 2.1) – eine alternative integrative Theorie der menschlichen (Neuro-)Kognition und Intelligenz als dynamischem System postuliert, versucht der „(Neo-)Konnektionismus“ (engl. “(neo-)connectionism”) mit der Theorie der (künstlichen) neuronalen Netzwerke (engl. “(artificial) neural network theory”) (Kap. 2.2), die – in der Regel – vom Modelltyp her zu den dynamischen Systemen gehörend (Kap. 1.20), einen Ansatz (engl. “approach”) vorzulegen mit dem Ziel, grundlegend neue Einsichten in die Beschreibung und Erklärung des menschlichen Geistes bereitzustellen (Kap. 1.24.03).

7.21 Die Aufgabe der Konstruktion einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition (engl. “(integrated theory of (neuro-)cognition”) besteht nun m.E. darin, als eine Ergänzung zu den logikbasierten Modellen der traditionellen Symboltheorie die theoretischen vektorbasierten Modelle des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus dahingehend zu analysieren, ob und inwieweit sie mit den empirisch-experimentellen Daten und Modellen aus den (kognitiven) Neurowissenschaften, vor allem aus der kognitiven Neurobiologie, der (Neuro-)Psychologie und der medizinischen Neurophysiologie, übereinstimmen bzw. diese angemessen beschreiben bzw. erklären können, wonach daraufhin abzuwägen wäre, ob und inwieweit sich die beiden Paradigmen miteinander ergänzen, und zu einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition vereinen lassen, damit das gesamte mental-kognitive Spektrum von der elementaren, unbewußten Kognition (engl. “low level cognition”) bis hin zur höheren, bewußten Kognition (engl. “high level cognition”) und darüber hinaus, hin zu einer verkörpert Kognition (engl. “embodied cognition”) und einer sozialen Kognition (engl. “social cognition”) (Kap. 6.5) am besten modelliert werden kann.

M.a.W. besteht dabei u.a. die Aufgabe ferner darin, ausgehend von der „Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte“ (Kap. 5.1.01.11), in der Auseinandersetzung zwischen der klassischen symbolorientierten Künstlichen Intelligenz und der neueren konnektionistischen Künstlichen Intelligenz ein vertieftes Verständnis der (sub-)symbolischen Informationsverarbeitungsprozesse im menschlichen Gehirn zu gewinnen, sodaß damit ein Beitrag geleistet werden kann, wie (menschliches) „intelligentes“ Verhalten und Handeln mit Hilfe von (neuro-)kognitiven komputationalen Strukturen, Prozessen und Mechanismen angemessener zu erklären ist.

7.221 Letztlich hat dies dann im Rahmen einer (nichtlinearen) Dynamischen Systemtheorie (Kap. 1.2) zu der Frage geführt, was unter den Begriffen der Information, Informationssegregation und Informationsintegration im Informationsverarbeitungsansatz des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus grundsätzlich verstanden wird (Kap. 4.2.01)²¹⁶¹, um auf dieser Basis eine umfassende

2161 Vgl. hierzu auch O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London.

Mehr-Ebenen-Modellkonzeption der (menschlichen) Kognition und Intelligenz zu begründen: die (Neuro-)Kognition mit integrativen (Synchronisations-)Mechanismen als ein (sub-)symbolisches komplexes dynamisches System im Rahmen einer vektorbasierten Form (Kap. 4, Kap. 5, Kap. 6.15). Gemäß den Konzepten aus der Neuroinformatik kodiert man mentale Strukturen und Prozesse mit Vektor- und Tensortransformationen und neuronalen (Konnektions-)Matrizen. Analog zur (Ordnungs-)Musterentstehung im Rahmen der Modelle der natürlichen Evolution anhand von physikalischen, chemischen und biologischen Selbstorganisationsprinzipien (Kap. 1.25.01-06) läßt sich nun (Muster-)Erkenntnis und im allgemeinen mentale Information und (Neuro-)Kognition als eine Selbstorganisation von (künstlichen) neuronalen Netzwerken verstehen, was zu einer theoretischen Neurophilosophie (engl. "theoretical neurophilosophy") führt, die m.E. den Kern und die Einheit eines fachübergreifenden Forschungsprogramms²¹⁶² über den menschlichen Geist und das menschliche (Selbst-)Bewußtsein darstellen könnte (Kap. 1.24.04). Diese basiert dabei auf diversen Forschungsstandards, z.B. beginnend mit der Position des österreichischen Biologen und Systemtheoretikers Ludwig von BERTALANFFY's mit der Selbstregulation eines dynamischen Gleichgewichts („Fließgleichgewicht“) (Kap. 1.24.01) bis hin zu der Position der statistischen Thermodynamik fern des thermischen Gleichgewichts i.S. der „dissipativen Selbstorganisation“ i.S. des russisch-belgischen Physikochemikers und Philosophen Ilja PRIGOGINE (Kap. 1.25.01) und der „Synergetik“ des theoretischen Physikers Hermann HAKEN (Kap. 1.25.02). Danach entstehen anhand von dissipativen Phasenübergängen Klassen von (emergenten) mathematischen Strukturen, die im Rahmen der Theorie der nichtlinearen komplexen Dynamischen Systeme als „Attraktoren“ (engl. "attractors") mit nichtlinearer Dynamik konstruiert werden (Kap. 1.22). Wird nun das menschliche Gehirn als ein solches komplexes dynamisches System aufgefaßt, kann der Wahrnehmungs- und Erkenntnisvorgang mit dem Physiologen und Physiker Hermann von HELMHOLTZ eben keine statische, linear-isomorphe Abbildung sein, sondern es handelt sich um ein nichtlineares, dynamisches und statistisches Wissenverarbeitungs-, Lern- und Erkenntnisverfahren, das z.B. i.S. des finnischen Neuroinformatikers Teuvo KOHONEN (Kap. 4.4.01), des U.S.-amerikanischen Mathematikers und Neuroinformatikers Steven GROSSBERG (Kap. 4.4.02), des britischen Mediziners und Neurowissenschaftlers Karl FRISTON (Kap. 4.3.03) und des U.S.-amerikanischen Neurobiologen und Philosophen Walter J. FREEMAN (Kap. 5.2.01) als ein Selbstorganisationsprozeß eines neurokognitiven Systems verstanden wird, indem im Rahmen eines beständig ablaufenden komputationalen Adaptationsprozesses „topographische (Merkmals-)Karten“ (engl. "topographical (feature) maps") der Welt als Systemumgebung konstruiert werden, in denen die wichtigsten Ähnlichkeits- und Häufigkeits- und Verteilungsrelationen zwischen den sensorischen Informationen in geometrische (Vektorraum-)Di-

2011. PP. 184-90.

2162 Eine verwandte Position nimmt z.B. Kl. MAINZER: Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie. In: G. KAISER (Hrsg.): Kultur und Technik im 21. Jahrhundert. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1993. S. 121-27 und Kl. MAINZER: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Campus Verl. Frankfurt, New York. 1994. S. 137-44 ein.

stanzrelationen der jeweils entsprechend aktiven Neuronen(-populationen) transformiert werden.

7.222 Eine (neuro-)kognitive dynamische Struktur stellt m.E. demnach das Resultat von neuroelektrischen und neurochemischen Selbstorganisationsprozessen in nicht schon mental begabter Materie dar²¹⁶³, d.h. es gibt (Wahrnehmungs- und Lern-)Prozesse in neuralen Netzen im menschlichen Gehirn, die zur Entwicklung einer zunächst nicht vorhandenen (neuro-)kognitiven Konfiguration von Synapsenmodulationen führen, wobei ein Neuron mit plastischen (stochastischen) Synapsen i.S. des kanadischen Psychologen Donald O. HEBB (Kap. 2.2), des israelischen Neurophysiologen und technischen Biomediziners Moshe ABELES (Kap. 5.2.03), des Mathematikers Wolfgang MAASS (Kap. 5.4.01) und den technischen (Neuro-)Informatikern Karim EL-LAITHY und Martin BOGDAN (Kap. 5.4.02) als ein „Koinzidenzdetektor“ (engl. „coincidence detector“) fungiert, und eine Population von synchronisiert arbeitenden Neuronen, die „(cell) assemblies“ (Kap. 3.2), relationale Eigenschaften der Sachverhalte in der Welt kodieren, weshalb diese prozessuale Signalkonfiguration einer Neuronenpopulation eine (neuro-)mentale Repräsentation konstituiert, und dieser Koinzidenzdetektor-Algorithmus i.S. D.O. HEBB's selbstorganisiert zu einem kohärenten System von (neuro-)mental Repräsentationen führt.

Dementsprechend ist m.E., z.B. mit dem Physiker und Neuroinformatiker Christoph von der MALSBURG²¹⁶⁴ (Kap. 1.25, Kap. 3.31, Kap. 5.1.10), dem chilenischen (Neuro-)Biologen und Philosophen Humberto R. MATUREANA²¹⁶⁵ (Kap. 1.25) und dem Wissenschaftstheoretiker und Philosophen Klaus MAINZER²¹⁶⁶ (Kap. 6.15.08), für eine statistische Korrelationstheorie der neuronalen Funktion zu optieren, wonach der (kausale) Mechanismus des dynamischen Zusammenbindens von elementaren semantischen Symbolen zu komplexen Symbolstrukturen darin besteht, daß sich eine Population von Neuronen mit synchron korrelierten Signalen einstellt, derart, daß sich gewisse Konfigurationen der Synapsenvariablen mit optimaler kollektiver Kooperation zwischen den aktiven Synapsen – im Vergleich zu konkurrierenden suboptimalen Konfigurationen – stabilisieren, u.z. basierend auf „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen“ (engl. „probability density functions“) (Kap. 4.4.01.1).

7.223 Damit gelangt man zum „Bindungsproblem“ (engl. „binding problem“) in den kognitiven Neurowissenschaften (Kap. 3.3) in Form des „Feature Binding“ (Kap. 3.420), insbesondere gem. der „Binding by Synchrony Hypothesis“ (Kap. 3.4) i.S. der Neurophysiologen Wolf SINGER und Andreas K. ENGEL sowie dem

2163 Eine verwandte Position nimmt z.B. H. FLOHR: Denken und Bewußtsein. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Frankfurt, New York. 1994. S. 341-47 ein.

2164 S. Chr. von der MALSBURG: Gehirn und Computer. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn - Geist - Kultur*. Frankfurt, New York. 1994. S. 287-90.

2165 S. H. MATUREANA: Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): *Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur*. Frankfurt, New York. 1994. S. 166-70.

2166 S. Kl. MAINZER: Quanten, Chaos und Selbstorganisation. Philosophische Aspekte des physikalischen Weltbildes. In: Kl. MAINZER / W. SCHIRMACHER (Hrsg.): *Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik*. BI-Wissenschaftsverl. Mannheim u.a. 1994. S. 54-60.

Physiker und Neurophysiologen Peter KÖNIG et al., wonach die intra- und intermodale Integration von sensorischen Informationen auf die (phasen-)synchronen Oszillationen der beteiligten Neuronenverbände zurückzuführen sei, m.a.W. diese dafür verantwortlich seien, aus einer Vielzahl von Sinneseindrücken innerhalb eines Sinnes eine vereinheitlichende Sinneswahrnehmung herzustellen bis hin zur Verknüpfung, der Zusammenbindung der Sinneswahrnehmungen der verschiedenen Sinne zu einer einheitlichen Gesamtwahrnehmung, sodaß damit u.a. empirisch-experimentelle Belege vorliegen, die es rechtfertigen, das Problem der (semantischen) Kompositionalität anhand von konnektionistischen Mechanismen auf der Basis dieses (Phasen-)Synchronisations-Prinzips zu modellieren (Kap. 5), z.B. von dem Wissenschaftstheoretiker und (Neuro-)Philosophen Markus WERNING (Kap. 5.3.01), dem US-amerikanischen Mathematiker und Neuroinformatiker Steven GROSSBERG (Kap. 4.4.02) und von dem indischen Neuroinformatiker Lokendra SHASTRI (Kap. 5.1.05), wodurch m.E. der Nutzen einer prozeßorientierten Perspektive auf scheinbar strukturelle Phänomene des Symbolverarbeitungsparadigmas überzeugend demonstriert wird (Kap. 5).

7.224 Das Prinzip der neuralen Systemorganisation, das auf einer noch zu entwickelnden Generellen Theorie der Selbstorganisation basiert, besteht nun m.E., in Anlehnung an den Physiker und Neuroinformatiker Christoph von der MALS-BURG²¹⁶⁷, in den von der biogenetischen Evolution hervorgebrachten fundamentalen Algorithmen, z.B. i.S. der HEBB-, HOPFIELD-, KOHONEN- oder GROSSBERG-Algorithmen (Kap. 2.2, Kap. 4.4). Diese Fundamentalalgorithmen stellen m.E. somit – im Rahmen der vektoriellen Form (Kap. 5.1.05) – die Bedingungen der Möglichkeit der neurokognitiven Informationsverarbeitung dar: Mit dem australischen Philosophen Tim(-othy) van GELDER und dem U.S.-amerikanischen Linguisten Robert F. PORT (Kap. 1.24) entspräche dies dann einem dynamischen Systemmodell, das diese Algorithmen als sog. „(formale) Prozeßstrukturen“²¹⁶⁸ interpretiert, die, i.S. einer Verfahrens(-berechnungs-)vorschrift, es erst ermöglicht, daß der Informationsberechnungsfluß in Form von nichtlinearen dynamischen Vektorfeldern zu einer (relativ) robusten²¹⁶⁹ neurokognitiven Systemstruktur konvergiert (Kap. 6.15), z.B. einem Attraktor, analog zu der nichtlinearen Nichtgleichgewichts-Thermodynamik im Rahmen der „Theorie der dissipativen Strukturen“ (engl. “dissipative structures theory”) nach dem russisch-belgischen (Physiko-)Chemiker Ilya PRIGOGINE, dem französischen Physiker Paul GLANS-DORFF und dem griechisch-belgischen Physiker Grégoire NICOLIS²¹⁷⁰ (Kap. 1.25).

7.225 Um nun eine Integration von (kognitiver) Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie und den kognitiven Neurowissenschaften zu bewerkstelligen (Kap. 6.2), ist es daher m.E., in Anlehnung an den österreichischen Philosophen und Wis-

2167 S. Chr. von der MALS-BURG: Gehirn und Computer. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Frankfurt, New York. 1994. S. 279-83.

2168 Zum Begriff der sog. „Prozeßstruktur“ s. E. JANTSCH: Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien. (1979) 1992.

2169 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 210-12.

2170 S. hierzu die Ausführungen in Kap. 1.25.01.

senschaftstheoretiker Erhard OESER²¹⁷¹, notwendig, eine moderne dynamische vektorbasierte (Informations-)Strukturtheorie zu begründen, d.h., zum einen, nicht nur in den kognitiven Neurowissenschaften das menschliche Gehirn als Informationsverarbeitungssystem zu verstehen, sondern auch, zum anderen, das menschliche Erkenntnisvermögen als Informationsverarbeitungsprozeß zu betrachten. Danach werden die als invariant gesetzten, sensorischen Elementarinformationen systemrelativ und systemrelevant selektiert, sodaß bei der Umwandlung der externen Informationsstruktur in interne neuronale (Signal-)Informationen deren ursprüngliche „Bedeutung“ als Umgebungseigenschaften „verloren geht“, und statt dessen ihnen eine neue systemintern konstruierte systemrelative „Bedeutung“ zugewiesen wird, m.a.W., wird mit dem Physiker und Neuroinformatiker Christoph von der MALSBURG²¹⁷² nach der h.M. in den Neurowissenschaften jedes Neuron als ein Träger einer „semantischen (Mikro-)Information“ aufgefaßt, und diese „semantischen Elementarinformationen“ aller aktuell aktiven Neuronen werden dann im Rahmen von integrativen Mechanismen bis hin zu semantischen Symbolen und Symbolstrukturen zusammengesetzt. Im Rahmen eines selektiven Informationsprozesses wird also ein sensorischer Stimulus als transformierte prozessuale Information daher nur im Kontext einer schon vorhandenen (relationalen) Strukturinformation des neuromentalen Systems selbst zu weiteren neuen Informationen kodiert.

Dies würde damit m. E. – analog zu einer Selektionstheorie der Informationskinetik im Rahmen der „Theorie der Hyperzyklen“ (engl. “hypercycle theory”) im Sinne des Bio- und Physikochemikers Manfred EIGEN (Kap. 1.25.03) – zu einer (statistischen) “theory of neuronal group selection” des U.S.-amerikanischen Mediziners und Molekularbiologen Gerald M. EDELMAN führen (Kap. 4.13, Kap. 4.3.01), wonach die Dynamik einer kohärenten Neuronenpopulation auf der statistischen Selektion von neuronaler (Reiz-)Information basiert, sodaß sich die Neuronenverbände als Ganzes beinahe i.S. der Prinzipien einer kollektiven Intelligenz (engl. “principles of collective intelligence”) (Kap. 4.26) verhalten und nach einem „relativ stabilen, transienten Optimum an neuronaler Resonanz“²¹⁷³ streben.

7.231 Damit würde man m.E. anhand von computersimulierten Modellen zu Ansätzen einer Sprach- und Erkenntnistheorie im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus gelangen (Kap. 6.3, Kap. 6.4), gegründet auf der kognitiven (Neuro-)Architektur, z.B. der “Oscillatory Networks” des Wissenschaftstheoretikers und (Neuro-)Philosophen Markus WERNING (Kap. 5.3.01), des “Neural

2171 S. E. OESER: Die Selbstorganisation der Information im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verl. Bonn. 1998. S. 151-61.

Einführend zum Begriff der Information siehe auch H. LYRE: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verl. München. 2002 und Fr. SCHWEITZER: Selbstorganisation und Information. In: H. KRAPP / Th. WAGENBAUR (Hrsg.): Komplexität und Selbstorganisation – „Chaos“ in Natur- und Kulturwissenschaften. Wilhelm Fink Verl. München. 1997. S. 99-129.

2172 S. Chr. von der MALSBURG: Gehirn und Computer. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Frankfurt, New York. 1994. S. 286-87.

2173 S. G.M. EDELMAN: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987.

Engineering Framework (NEF)“ des kanadischen Philosophen und theoretischen Neurowissenschaftlers Chris ELIASMITH und des kanadischen Informatikers und Kognitionswissenschaftlers Terrence C. STEWART oder der “Integrated Connectionist / Symbolic (ICS) Cognitive Architecture“ des U.S.-amerikanischen Physikers P. SMOLENSKY (Kap. 5.1.01), der die grundlegende Frage wieder aufgreifend, welche Berechnungsweise die menschliche Kognition zutreffender darstelle, entweder die die Verarbeitungsweise des Gehirns beschreibende, numerische kognitive Architektur des Konnektionismus (engl. “brain-as-numerical-computer“), oder die die Verarbeitungsweise des Geistes beschreibende, symbolische kognitive Architektur des Symbolismus (engl. “mind-as-symbolic-computer“), man mit P. SMOLENSKY²¹⁷⁴ eine vermittelnde Position einzunehmen hat: Im Rahmen einer Gesamtbetrachtung der menschlichen Kognition ist das Gehirn bzw. der Geist ein und dasselbe nichtlineare dynamische komplexe System, das auf einer niedrigeren formalen Beschreibungsebene – bezogen auf die biophysikalische – ein massiv paralleler, numerischer „Computer“ ist, und zugleich, auf einer höheren Beschreibungsebene ein regelbeherrschter traditioneller „Computer“ von diskreten Symbolstrukturen ist. Somit hätte diese integrative Theorie der Kognition das mit der (Heraus-)Forderung des U.S.-amerikanischen Philosophen J.A. FODOR's und des kanadischen Philosophen Z.W. PLYSHYN's verbundene Dilemma im Rahmen der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte gelöst, indem die extremen Positionen des Eliminativismus z.B. i.S. des kanadischen Philosophen Paul M. CHURCHLAND²¹⁷⁵, wonach Symbolstrukturen wegen ihrer mangelnden neurobiologischen Plausibilität nicht in einer Theorie der (Neuro-)Kognition verwendet werden dürften, und des Implementationismus i.S. des U.S.-amerikanischen Philosophen Br.P. McLAUGHLIN²¹⁷⁶, wonach künstliche neuronale Netzwerke Symbolstrukturen „bloß implementieren“, abzulehnen sind. Vielmehr hätte diese integrative Theorie der (Neuro-)Kognition m.E. die Vorzüge sowohl der symbolorientierten wie auch der vektororientierten Berechnungsweise zu vereinigen, indem, zum einen, die Leistung ersterer erhalten bleibt – über eine „innere“ „Sprache des Geistes“ (engl. “language of thought (LOT)“) i.S. J.A. FODOR's²¹⁷⁷ mit rekursiver und kombinatorischer Syntax und Semantik auf der Basis von internen mentalen Repräsentationen – eine erfolgreiche Erklärung und Voraussage von menschlichem Verhalten und Handlungen aufgrund der Zuschreibung von „propositionellen Einstellungen“ (engl. “propositional attitudes“) bereitzustellen, und, zum anderen, der Vorteil letzterer bewahrt wird, kognitive und mentale Prozesse im weitesten Sinn – und damit

2174 S. P. SMOLENSKY / G. LEGENDRE: *The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar*. Vol. 1: *Cognitive Architecture*. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006. PP. 31-33.

2175 S. z.B. P.M. CHURCHLAND: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. The MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 1989 und W. RAMSEY / St. STICH / J. GARON: *Connectionism, Eliminativism and the Future of Folk Psychology*. *Philosophical Perspectives*. Vol. 4. 1990. PP. 499-533.

2176 S. Br.P. McLAUGHLIN: *Classical Constituents in Smolensky's ICS Architecture*. In: M.L. DALLA CHIARA et al. (Eds.): *Structures and Norms in Science*. Volume Two of the Tenth International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Florence. August 1995. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/NL. 1997. PP. 331-43.

2177 S. z.B. J.A. FODOR: *The Language of Thought*. Harvester Press. Sussex. 1976 PP. 75-79, 198-99.

„Geist“ und „(Selbst-)Bewußtsein“ – auf plausible Elementarberechnungen i.S. der Neuroinformatik, der kognitiven Neurobiologie, der kognitiven Neuropsychologie und der medizinischen Neurophysiologie zurückzuführen (Kap. 5.1.01, 6.4).

7.232 Um nun eine allgemeine Sprach- und Erkenntnistheorie im Paradigma des Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus zu begründen, hätte man demnach eine intensive Analyse des Informationsverarbeitungsmodells im Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus vorzunehmen (Kap. 6.15, 6.2): Es wäre m.E. nun zu erwägen, die fundamentalen Funktionsprinzipien von künstlichen neuronalen Netzwerken als eine Weiterentwicklung und Ergänzung der „komputationalen Form“ i.S. des Philosophen, Mathematikers und (Natur-)Wissenschaftlers G.W. LEIBNIZ (Kap. 6.11), der „assoziativen Form“ i.S. des schottischen Philosophen und Historikers David HUME (Kap. 6.12), der „kategorialen Form“ i.S. des Philosophen Immanuel KANT (Kap. 6.13) und der „logischen Form“ i.S. des Wiener Kreises (Kap. 6.14) und damit i.S. des Logikers, Mathematikers und Philosophen Gottlob FREGE, des englischen Logikers, Mathematikers und Philosophen Bertrand RUSSELL und des österreichisch-britischen Logikers und Philosophen Ludwig WITTGENSTEIN zu betrachten, hin zu einer, m.E. am besten zu bezeichnenden, sog. „vektoriellen Form“ als Basis eines Modells einer integrativen Theorie der (Neuro-)Kognition im Rahmen eines (Generellen) Dynamischen System- und Selbstorganisations-Paradigmas, d.h. im Sinn von konstitutiven Prinzipien der kognitiven Konstruktion von Realität, m.a.W. als die Bedingungen der Möglichkeit von Informations- und Wissensverarbeitung im Rahmen von künstlicher und natürlicher Intelligenz und damit von Erkenntnis, wobei selbstverständlich diese Funktionsprinzipien mit den empirisch-experimentellen Belegen aus den (kognitiven) Neurowissenschaften abzugleichen sind.

Diese Funktionsprinzipien, grundgelegt z.B. in den Aktivierungs- und Propagierungsfunktionen (Kap. 6.11), in Form von neurokognitiven (Lern-)Algorithmen, z.B. der „HEBB'schen Lernregel“ (engl. "HEBB('s) rule") (Kap. 2.2), dem „KOHONEN-Algorithmus“ (Kap. 4.4.01) oder dem GROSSBERG-Algorithmus (Kap. 4.4.02), gründen sich dabei auf die Informationsverarbeitungsweise der Synapsenvektoren von subsymbolischen Neuronen eines künstlichen Neuronalen Netzwerks, wobei diese Arbeitsweise als adaptive Mikromechanismen i.S. der Evolutionsbiologie²¹⁷⁸ (Kap. 1.25.06) und der sog. „Evolutionären Erkenntnistheorie“ i.S. des österreichischen Zoologen und Ethologen Konrad LORENZ²¹⁷⁹ ver-

2178 Vgl. z.B. P. SMOLENSKY: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 14-16, 19.

2179 Die Kernthese der Evolutionären Erkenntnistheorie wird von K. LORENZ wie folgt umschrieben: In seinem Aufsatz „KANTS LEHRE VOM APRIORISCHEN IM LICHT GEGENWÄRTIGER BIOLOGIE.“ Blätter für Deutsche Philosophie. Bd.15. S. 94-125 aus dem Jahr 1941 führt er aus: „Das reale Verhältnis zwischen dem An-Sich der Dinge und der speziellen ‚apriorischen‘ Form ihrer Erscheinung (...) ist dadurch gegeben, daß diese Form in der Jahrzehntausende währenden Entwicklungsgeschichte der Menschheit in der Auseinandersetzung mit den täglich begegnenden Gesetzmäßigkeiten des An-Sich-Seienden als eine Anpassung an diese entstanden ist (...)“ (S. 98), wobei er unter dem Begriff der „Anpassung“ folgendes verstanden wissen will: Sie „soll (...) nicht mehr besagen, als daß unsere Anschauungsformen und Kategorien so auf das real Existierende ‚passen‘, wie (...) die Flosse eines Fisches ins Wasser.“ (S. 99) (...) „Aber so wie der Huf des Pferdes auf den Steppenboden paßt, mit dem er sich auseinandersetzt, so paßt unsere zentralnervöse Weltbild-

standen werden kann, m.a.W. als einfache, (An-)Passung erzeugende (Nahbereichs-)Berechnungs(-verfahrens-)vorschriften in Bezug auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu verarbeitenden Datenvektoren, sodaß – im Rahmen einer mathematisch-exakten vektoriellen Distanzmetrik (Kap. 4.21) – die zu verarbeitende (sensorische) Information in eine „vektorielle Form“ transformiert²¹⁸⁰ wird, und damit z.B. neurokognitive Wahrnehmungs-, Vorstellungs-, Sprach-, Denk- und Problemlösungs(-zustands-)räume konstruiert werden (Kap. 5.2.05), worauf einige empirisch-experimentellen Belege aus den kognitiven Neurowissenschaften hinzudeuten scheinen.²¹⁸¹

Apparatur auf die reichhaltige reale Welt, mit der sich der Mensch auseinandersetzen muß, und wie jedes Organ, so hat auch sie ihre (...) Form in äonenlangem stammesgeschichtlichem Werden durch diese Auseinandersetzung von Realem mit Realem gewonnen.“ (S. 99)

Auch in seinem Aufsatz „DIE ANGEBORENEN FORMEN MÖGLICHER ERFAHRUNG.“ Zeitschrift für Tierpsychologie. Bd. 5. S. 235-409 aus dem Jahr 1943 geht er von der „Arbeitshypothese“ aus, daß „die von Erfahrung unabhängigen Denk- und Anschauungsformen des Menschen von grundsätzlich derselben Natur seien, wie viele angeborenermaßen zweckmäßige Reaktionsweisen von Tieren, welche als Anpassungen zu verstehen sind, die wie irgendwelche Organe im Laufe der Stammesgeschichte in Auseinandersetzung mit der Umwelt (...) entstanden“ sind (S. 396), und in seinem Aufsatz „PSYCHOLOGIE UND STAMMESGESCHICHTE.“ In: K. LORENZ: „ÜBER TIERISCHES UND MENSCHLICHES VERHALTEN.“ Bd. 2. S. 201-54 aus dem Jahr 1954 legt er dar, daß „die unbestreitbare und unbestrittene Tatsache der Deszendenz die Erkenntnis mit sich bringt, daß eine unermeßliche Zahl von Struktureigenschaften menschlichen Verhaltens und Innenlebens ihr So-und-nicht-anders-Sein dem historisch einmaligen Gange der Phylogenese verdankt und ohne Einsicht in deren Zusammenhänge schlechterdings unverständlich bleiben muß. Für die sozialen Verhaltensnormen des Menschen gilt dies in besonders hohem Maße (...).“ (S. 252) In seinem Aufsatz „GESTALTWAHRNEHMUNG ALS QUELLE WISSENSCHAFTLICHER ERKENNTNIS.“ In: K. LORENZ: „ÜBER TIERISCHES UND MENSCHLICHES VERHALTEN.“ Bd. 2. S. 255-300 betont er schließlich, daß für ihn als vergleichendem Verhaltensforscher „die Organisation der Sinnesorgane und des Nervensystems, deren Funktion uns Mitteilung über außersubjektive Wirklichkeiten macht, nicht anders ist als die aller anderen körperlichen Strukturen ganz selbstverständlich etwas, das im Verlaufe des Artenwandels in Auseinandersetzung mit und in Anpassung an diese unverrückbaren Gegebenheiten entstand“, weshalb es „für den naturwissenschaftlich Denkenden“ eine „kaum zu bezweifelnde Tatsache“ darstelle, daß auch unsere Weltbild-Apparatur im Laufe der Evolution in Auseinandersetzung mit den mitleidlosen Gegebenheiten der wirklichen Außenwelt entstanden ist (...).“ (S. 262, 264).

S. auch K. LORENZ: Die Rückseite des Spiegels. Versuch einer Naturgeschichte menschlichen Erkennens. Deutscher Taschenbuch Verlag. München. (1973) 1977. S. 35-46.

Einführend in die sog. „Evolutionäre Erkenntnistheorie“ s. z.B. E.-M. ENGELS: Erkenntnis als Anpassung? Eine Studie zur Evolutionären Erkenntnistheorie. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1989.

2180 Zur Transformationsfunktion s. z.B. O. BREIDBACH: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 102 und J. SCHRÖDER: Die Sprache des Denkens. Verl. Königshausen & Neumann GmbH. Würzburg. 2001. S. 144-46, v.a. Fn. 156 und S. 224-28, der von einer „verteilenden Transformation“ spricht.

2181 Zu den ersten Belegen aus den kognitiven Neurowissenschaften, daß sich die Arbeitsweise des Gehirns tatsächlich mit dem Instrumentarium der Vektoralgebra beschreiben läßt, s. z.B. die Publikationen über den sog. „Populationsvektor“ (engl. „population vector“) nach A.P. GEORGOPOULOS / J.T. LURIOT / M. PETRIDES / A.B. SCHWARTZ / J.T. MASSEY: Mental Rotation of the Neuronal Population Vector. Science. Vol. 243. 1989. PP. 234-36 und die Publikationen über die sog. „Neurogeometrie“ (engl. „neurogeometry“) der sensomotorischen Koordination im Cerebellum nach A. PELLIONISZ / R. LLINÁS: Brain Modelling by Tensor Network Theory and Computer Simulation. The Cerebellum: Distributed Processor for Predictive Coordination. Neuroscience. Vol. 4. 1979. PP. 323-48.

Man könnte nun m.E. erwägen, den Systemtheoretischen (Neo-)Konnektionismus mit der Theorie der künstlichen neuronalen Netzwerke, indem er von der mathematischen Modelltypologie her zu den (nichtlinearen) dynamischen (komplexen) Systemen gehörend betrachtet wird (Kap. 4.21), i.S. einer zu entwickelnden Einheitswissenschaft (engl. "unified science")²¹⁸² i.S. einer Mathesis Universalis i.S. G.W. LEIBNIZ' in eine „Generelle (Dynamische) Systemtheorie“ (engl. "General (Dynamic) System Theory (G(D)ST)") einzubetten, worauf in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht eingegangen werden kann.

7.240 Daran anknüpfend kann man nun m.E., in Anlehnung an den russisch-belgischen Physikochemiker und Philosophen Ilja PRIGOGINE (Kap. 1.25.01) und des britischen Mediziners und Neurowissenschaftlers Karl FRISTON (Kap. 4.3.03), das neurokognitive System des Menschen als ein nichtlineares offenes Nichtgleichgewichts-System beschreiben, das im Rahmen einer nichtlinearen Nichtgleichgewichtsneurodynamik dadurch ausgezeichnet werden kann, daß es während eines beständigen Informationsverarbeitungsflusses²¹⁸³ bestrebt ist, systemrelativ relevante Informationselemente von hohem Ordnungsgrad aus seiner Systemumgebung mit optimaler Effizienz²¹⁸⁴ herauszufiltern und in seine bis dahin aufgebauten Informationsstrukturen optimal mit einzubinden.

7.241 Mit Bezug auf das mathematische Modell der gekoppelten Oszillatoren, z.B. in der (Neuro-)Architektur der "Oscillatory Networks" des Wissenschaftstheoretikers und (Neuro-)Philosophen Markus WERNING (Kap. 5.3.01), veranschaulicht in der sog. „Gebirgssee-“ und „Gebirgsbach“-Metapher (Kap. 6.22), kann man sich m.E., vereinfachend ausgedrückt, die Informationsverarbeitungsweise des menschlichen Gehirns und damit die Arbeitsweise des menschlichen Geistes anhand von (1) selbsterregten, (2) sich selbst verstärkenden, (3) einander sich überlagernden und (4) mehrfach in Kreislauf(-fließ-)mustern rückgekoppelten²¹⁸⁵ Wahrscheinlichkeitswellen vorstellen, die anhand von nichtlinearen dynamischen Vektorfeldern in n -dimensionalen Systemzustandsräumen modelliert werden können (Kap. 6.21), sodaß man m.E. von der Hypothese einer (Wahrscheinlichkeits-)Wellenfeldtheorie des menschlichen Geistes sprechen könnte.

7.242 Demnach ist das (Ab-)Speichern und das (Wieder-)Abrufen von neuronalen Informationen im (Langzeit-)Gedächtnis m.E. am überzeugendsten im Rahmen von Resonanzmechanismen zu modellieren²¹⁸⁶, angelehnt z.B. an den Prozeßmechanismus der "(adaptive) resonance" im Rahmen der "Adaptive Resonance Theory (ART)" des U.S.-amerikanischen Mathematikers und Neuroinformatikers Steven GROSSBERG und der U.S.-amerikanischen Mathematikerin und

S. hierzu die Ausführungen in Kap. 3.24.1.

2182 S. z.B. P. SMITH CHURCHLAND: Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986 – L. PADULO / M.A. ARBIB: System Theory: A Unified State-Space Approach to Continuous and Discrete Systems. W.B. Saunders Co. Philadelphia/PA. 1974.

2183 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 252-53.

2184 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 139-40.

2185 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: Networks of the Brain. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 190-93, 193-95.

2186 Vgl. auch H. KRÖGER: Why are Probabilistic Laws Governing Quantum Mechanics and Neurobiology. Chaos, Solitons and Fractals. Vol. 25. 2005. PP. 815-34, v.a. PP. 826-27, 829-31.

Neuroinformatikerin Gail A. CARPENTER (Kap. 4.4.02.7), des "K0-KV (KATCHALSKY) Set Attractor Network Models" des U.S.-amerikanischen Neurobiologen und Philosophen Walter J. FREEMAN und des "Synfire Chain (SFC) Model" des israelischen Neurophysiologen und technischen Biomediziners Moshe ABELES (Kap. 5.2.03), wonach ein Informationselement – als ein Gegenstand betrachtend – nicht passiv in einen Gedächtnisspeicher abgelegt und wieder abgerufen wird, sondern das Gedächtnis selbst als ein fortlaufend fließendes (Informationsverarbeitungs-)Geschehen in der Zeit aufgefaßt wird, das zum Zeitpunkt des Wiederabrufens einer Information diese im Wege eines Energietransformationsprozesses von kaskadenaktivierten Assemblyformationen in einen angeregteren (Schwingungs-)Zustand versetzt, sodaß die Gedächtnisfunktion von Neuronenpopulationen ausgeführt wird, die zugleich sowohl das Abspeichern von Information als auch deren Verarbeitung i.S. eines Prozesses vornehmen²¹⁸⁷, m.a.W. das (Gedächtnis-)Geschehen m.E. am besten mit dem Begriff einer sog. „Prozeßstruktur“ umschrieben werden kann.

7.243 Dieser prozessuale bzw. dynamische Charakter der neuronalen Informationsverarbeitung²¹⁸⁸ findet in den letzten Jahren seinen Niederschlag in der Tendenz zu fluiden bzw. liquiden Mechanismen, Modellen und kognitiven (Neuro-)Architekturen (Kap. 5.4.01), die, m.E. überaus überzeugend, den andauernden transienten (neuronalen) Informationsfluß (engl. "(neural) information flow") auch mit Bezug auf die Anforderungen einer "Embodied Cognition" bzw. der "Brain-Body-Environment (BBE) interactions" i.S. R.D. BEER's²¹⁸⁹ modellieren können²¹⁹⁰, unter Einbeziehung der (Phasen-)Synchronizität der neuronalen Aktivität, wobei, vor allem an der fluiden Dynamik (engl. "fluid dynamic")²¹⁹¹ im Rahmen der Hydrodynamik in der Physik orientiert, allgemein wellentheoretische bzw. wellenmechanische Modellkonstruktionen²¹⁹² und, im besonderen, mathematische

2187 Eine verwandte Position nehmen z.B. H. JAEGER: *Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft*. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 159-61, v.a. S. 160 und A. SCHIERWAGEN: *Modelle der Neuroinformatik als Mittler zwischen neurowissenschaftlichen Fakten und Kognitionstheorien*. In: J.F. MAAS: *Das sichtbare Denken. Modelle und Modellhaftigkeit in der Philosophie und den Wissenschaften*. Editions Rodopi B.V. Amsterdam, Atlanta/GA. 1993. S. 151-52 ein.

2188 Vgl. hierzu z.B. O. SPORNS: *Networks of the Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 262-66.

2189 Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 6.51.

2190 Vgl. hierzu z.B. A. CLARK: *Supersizing the Mind. Embodiment, Action, and Cognitive Extension*. Oxford University Press. Oxford. 2008 – O. SPORNS: *Networks of the Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011. PP. 319-24.

2191 Grundlegend s. z.B. L.D. LANDAU / E.M. LIFSHITZ: *Fluid Mechanics*. Pergamon Press. Reading/MA, Addison-Wesley Publ. 1959.

Eingehend s. z.B. J. ZIEREP / K. BÜHLER: *Grundzüge der Strömungslehre. Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide*. 8. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2010.

2192 Eingehend s. z.B. G. BARD ERMENTROUT / D.H. TERMAN: *Mathematical Foundations of Neuroscience*. Springer-Verlag. New York, London. 2010 – P.S. NEELAKANTA / D.F. DE GROFF: *Neural Network Modeling. Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective*. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994 – W.C. TROY: *Wave Phenomena in Neuronal Networks*. In: N. AKHMEDIEV / A. ANKIEWICZ (Eds.): *Dissipative Solitons. From Optics to Biology and Medicine*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2008. PP. 431-52.

Einführend s. z.B. B. ERMENTROUT: *Neural Networks as Spatio-Temporal Pattern-Forming Systems*. *Reports on Progress in Physics*. Vol. 61. 1998. PP. 353-430, v.a. PP. 389-408.

Mit Bezug auf die Kompositionalitätsproblematik s. z.B. M. ABELES / G. HAYON / D. LEHMANN: *Mo-*

Konstruktionen aus der Theorie der sog. „Solitone“ (engl. “solitons”)²¹⁹³, d.h. Modelle auf der Basis von sog. „Wanderwellen“ (engl. “traveling waves”), m.E. sehr interessant sein könnten.

7.25 Dies gäbe daher m.E. Anlaß, die in den letzten Jahren aufkommende Debatte²¹⁹⁴ über den Begriff des (kognitiven) Mechanismus (engl. “(cognitive) mechanism”) im Rahmen des “mechanistic approach”²¹⁹⁵ in der Philosophie und Wissenschaftstheorie dahingehend weiterzuentwickeln, daß er auf die Beschreibung und Erklärung der prozessualen Aspekte der (Neuro-)Kognition von offenen dynamischen Systemen angewendet werden kann, wobei es m.E. sinnvoll wäre, den Begriff des kausalen Mechanismus mit dem des (dynamischen) Systems in Verbindung zu bringen, wofür auch der U.S.-amerikanische Wissenschaftstheoretiker und Philosoph William BECHTEL plädiert²¹⁹⁶: Danach wäre der Begriff des (kausalen) Mechanismus mit einem (relativ abstrakten) Komplex von (System-)Elementen zu umschreiben, die über (System-)Interaktionen miteinander agieren, sodaß er – mit Bezug auf den mathematischen Begriff der sog. „algebraischen Struktur“ (engl. “algebraic structure”)²¹⁹⁷ – definiert werden kann anhand (1) einer (Träger-)Menge von Elementen und (2) einer Menge von (fundamentalen) Operationen, mit denen man n -stellige Verknüpfungen über dieser Trägermenge ausführt, was auch die Begriffszerlegung von

deling Compositionality by Dynamic Binding of Synfire Chains. *Journal of Computational Neuroscience*. Vol. 17. 2004. PP. 179–201, v.a. P. 183 – E. BIENENSTOCK: A Model of Neocortex. *Network: Computation in Neural Systems*. Vol. 6. 1995. PP. 179–224, v.a. PP. 181, 186–88.

S. hierzu die Ausführungen in Kap. 5.2.03.2.

- 2193 Eingehend s. z.B. St. NETTEL (Ed.): *Wave Physics. Oscillations, Solitons, Chaos*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2009 – Th. DAUXOIS / M. PEYRARD: *Physics of Solitons*. Cambridge University Press. Cambridge. 2006 – Ph.G. DRAZIN et al.: *Solitons – An Introduction*. Cambridge University Press. Cambridge. 2002 – W.C. TROY: *Wave Phenomena in Neuronal Networks*. In: N. AKHMEDIEV / A. ANKIEWICZ (Eds.): *Dissipative Solitons. From Optics to Biology and Medicine*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2008. PP. 431–52, v.a. P. 434.

Einführend s. z.B. R. MEINEL / G. NEUGEBAUER / H. STEUDEL: *Solitonen – Nichtlineare Strukturen*. Akademie Verlag. Berlin. 1991.

- 2194 Zum Begriff des sog. „(mental bzw. kognitiven) Mechanismus“ (engl. “(mental / cognitive) mechanism”) s. Kap. 1.11.

Einen einführenden Überblick über die Debatte bietet z.B. St. GLENNAN: *Mechanisms*. In: St. PSILLOS / M. CURD (Eds.): *The Routledge Companion to Philosophy of Science*. Routledge Taylor & Francis Group. London, New York. 2008. PP. 376–84.

- 2195 S. St. GLENNAN: *Mechanisms*. In: St. PSILLOS / M. CURD (Eds.): *The Routledge Companion to Philosophy of Science*. Routledge Taylor & Francis Group. London, New York. 2008. P. 382.

- 2196 Vgl. die verwandte Position in D.M. KAPLAN / W. BECHTEL: *Dynamical Models: An Alternative or Complement to Mechanistic Explanations*. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 3. 2011. PP. 438–44, v.a. PP. 442–43 – W. BECHTEL / A. ABRAHAMSEN: *Dynamic Mechanistic Explanation: Computational Modeling of Circadian Rhythms as an Exemplar for Cognitive Science*. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. Vol. 1. 2010. PP. 321–33 – A. ABRAHAMSEN / W. BECHTEL: *Phenomena and Mechanisms: Putting the Symbolic, Connectionist, and Dynamical Systems Debate in Broader Perspective*. In: R. STAINTON (Ed.): *Contemporary Debates in Cognitive Science*. Basil Blackwell. Oxford. 2006. PP. 159–85.

S. auch die Begriffsbestimmung von W. BECHTEL in Kap. 1.11.

- 2197 S. hierzu die Ausführungen in Kap. 1.221.

Einführend s. z.B. K. ERK / L. PRIESE: *Theoretische Informatik. Eine umfassende Einführung*. 3. Aufl. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg. (2000) 2008. S. 18.

P. MACHAMER, L. DARDEN und C.F. CRAVER²¹⁹⁸ in "entities" und "activities" nahe legen würde.

Da es sich – gemäß dem "Free-Energy Principle" des britischen Mediziners und Neurowissenschaftlers Karl FRISTON – bei der (Neuro-)Kognition des Menschen um eine nichtlineare Dynamik eines offenen Nichtgleichgewichts-Systems handelt (Kap. 4.3.03), d.h. man beständig versucht, Informationen mit hohem Ordnungsgrad aus der Systemumgebung zum Zwecke der optimaleren Anpassung an sich ständig verändernde (System-)Umgebungsbedingungen herauszufiltern, kann man m.E. – in Analogie zu der „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“ in der statistischen Thermodynamik als einem Paradebeispiel eines dynamischen kausalen Mechanismus fernab vom Gleichgewicht – den neurokognitiven Informationsverarbeitungsfluß im Rahmen einer statistischen *Neurodynamik* ebenfalls anhand von informationellen (Prozeß-)Mechanismen beschreiben und damit erklären, u.z. in Form eines Komplexes von ineinandervernetzten nicht-linearen, stochastischen Differentialgleichungen, z.B. den jeweiligen Aktivierungs- und Lernfunktionen der betreffenden kognitiven (Neuro-)Architektur. Der beständige Informationsverarbeitungsfluß wird dann gemäß der jeweiligen (System-)Organisation vor allem nach Maßgabe von bereits bestehenden (System-)Strukturen derart gebahnt, daß anhand dieser formalen Prozeßalgorithmen bzw. Prozeßstrukturen immer wieder, selbstorganisiert, bereits bestehende relativ stabile neurokognitive Strukturen aufrechterhalten oder zu verbessern versucht werden, so wie die (Prozeß-)Konfiguration der chemischen Substanzen im Rahmen der „BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion“ aufrechterhalten wird, indem immer wieder verbrauchte (System-)Elemente im Rahmen der chemischen Reaktionskinetik durch neue zu ersetzen sind, sodaß der Anschein entsteht, als ob es sich um eine stabile Systemstruktur handeln würde.

Abschließend sei noch vermerkt, daß mit Bezug auf die in der vorliegenden Arbeit behandelten integrativen (Synchronisations-)Mechanismen man nunmehr zudem verschiedene Mechanismustypen zu unterscheiden hätte, u.z., z.B.

- (1) Prädikationsmechanismen,
- (2) Relationsmechanismen,
- (3) Konzeptmechanismen i.w.S.,
- (4) Inferenzmechanismen u.s.w.,

abhängig von dem Schema des jeweilig zu modellierenden (neuro-)kognitiven Sachverhalts.

2198 S. P. MACHAMER / L. DARDEN / C.F. CRAVER: Thinking about Mechanisms. Philosophy of Science. Vol. 67. 2000. PP. 1-25, v.a. PP. 2-4, v.a. P. 3: "Mechanisms are entities and activities organized such that they are productive of regular changes from start or set-up to finish or termination conditions. "

LITERATURVERZEICHNIS

- ABELES, M.: Local Cortical Circuits. An Electrophysiological Study. Springer-Verlag, Berlin. 1982
- ABELES, M.: Role of the Cortical Neuron: Integrator or Coincidence Detector? Israel Journal of Medical Sciences. Vol. 18. 1982. PP. 83–92
- ABELES, M.: Corticonics: Neural Circuits of the Cerebral Cortex. Cambridge University Press. Cambridge 1991
- ABELES, M.: Firing Rates and Well-Timed Events in the Cerebral Cortex. In: E. DOMANY / K. SCHULTEN / J.L. van HEMMEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Chapt. 3. Springer-Verlag, New York. 1994. PP. 121-40
- ABELES, M.: Synfire Chains. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1143-46
- ABELES, M. / PRUT, Y.: Spatio-Temporal Firing Patterns in the Frontal Cortex of Behaving Monkeys. Journal of Physiology Paris. Vol. 90. 1996. PP. 249-50
- ABELES, M. / HAYON, G. / LEHMANN, D.: Modeling Compositionality by Dynamic Binding of Synfire Chains. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 17. 2004. PP. 179–201
- ABRAHAM, F.D. / ABRAHAM, R.H. / SHAW, C.D. / GARFINKEL, A.: A Visual Introduction to Dynamical System Theory for Psychology. Aerial Press. Santa Cruz. 1990
- ABRAHAM, W.C. / ROBINS, A.: Memory Retention – the Synaptic Stability versus Plasticity Dilemma. Trends in Neurosciences. Vol. 28. 2005. PP. 73-78
- ABRAHAMSEN, A. / BECHTEL, W.: Phenomena and Mechanisms: Putting the Symbolic, Connectionist, and Dynamical Systems Debate in Broader Perspective. In: R. STANTON (Ed.): Contemporary Debates in Cognitive Science. Basil Blackwell. Oxford. 2006
- ABRAHAMSEN, A. / BECHTEL, W.: From Reactive to Endogenously Active Dynamical Conceptions of the Brain. In: T. REYDON / K.S. PLAISANCE: Philosophy of Behavioral Biology. Springer Science+Media B.V. Dordrecht. 2012
- ADRIAN, E.D. / ZOTTERMAN, Y.: The Impulses Produced by Sensory Nerve Endings. Part II: The Response of a Single End Organ. Journal of Physiology. Vol. 61. 1926. PP. 151-71
- AERTSEN, A. / GERSTEIN, G.L.: Evaluation of Neuronal Connectivity: Sensitivity of Cross-Correlation. Brain Research. Vol. 340. 1985. PP. 341-54
- AERTSEN, A. / GERSTEIN, G.L. / HARBIB, M.K. / PALM, G.: Dynamics of Neural Firing Correlation: Modulation of 'Effective Connectivity'. Journal of Neurophysiology. Vol. 61. 1989. PP. 900-17
- AERTSEN, A. / VAADIA, E. / ABELES, M. / AHISSAR, E. / BERGMAN, H. / KARMON, B. / LAVNER, Y. / MARGALIT, E. / NELKEN, I. / ROTTER, St.: Neural Interactions in the Frontal Cortex of a Behaving Monkey: Signs of Dependence on Stimulus Context and Behavioral State. Journal für Hirnforschung. Vol. 32. 1991. PP. 735-43

- AERTSEN, A. / BRAITENBERG, V. (Eds.): Information Processing in the Cortex. Experiments and Theory. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1992
- AIZAWA, K.: Representations without Rules, Connectionism and the Syntactic Argument. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 465-92
- AIZAWA, K.: The Systematicity Arguments. Kluwer. Academic Publishers. Boston u.a. 2003
- AJJANAGADDE, V. / SHASTRI, L.: Efficient Inference with Multiplace Predicates and Variables in a Connectionist System. In: Proceedings of the Eleventh Conference of the Cognitive Science Society. Ann-Arbor/MI. 1989. PP. 396-403
- AJJANAGADDE, V. / SHASTRI, L.: Rules and Variables in Neural Nets. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 121-34
- AKHMEDIEV, N. / ANKIEWICZ, A. (Eds.): Dissipative Solitons. From Optics to Biology and Medicine. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2008
- ALTNER, G. (Hrsg.): Die Welt als offenes System. Eine Kontroverse um das Werk von Ilya Prigogine. Fischer. Frankfurt am Main. 1986
- AMARI, Sh.-I.: Neuromanifolds and Information Geometry. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 751-57
- AMIRIKIAN, B. / GEORGOPOULOS, A.P.: Motor Cortex: Coding and Decoding of Directional Operations. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 690-96
- AMIT, D.J.: Neural Networks, Achievements, Prospects, Difficulties. In: W. GÜTINGER / G. DANGELMAYR (Eds.): The Physics of Structure Formation. Theory and Simulation. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1987. PP. 2-21
- AMIT, D.J.: Modeling Brain Function. The World of Attractor Neural Networks. Cambridge University Press. Cambridge u.a. 1989
- ANDERSON, Br.: Kohonen Neural Networks and Language. Brain and Language. Vol. 70. 1999. PP. 86-94
- ANDERSON, J.A.: A Simple Neural Network Generating an Interactive Memory. Mathematical Biosciences. Vol. 14. 1972. PP. 197-230
- ANDERSON, J.R.: Cognitive Psychology and its Implications. W.H. Freeman and Company. New York. 4th Ed. 1995 (dt.: Kognitive Psychologie. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1996)
- ANDERSON, M.L.: Embodied Cognition: A Field Guide. Artificial Intelligence. Vol. 149. 2003
- ANDERSON, M.L. / PERLIS, D.R.: Symbol Systems. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 281-87
- ANDRONOV, A.A. / CHAITIN, C.E.: Theory of Oscillations. Princeton University Press. Princeton. 1949
- ANTONY, M.V.: Fodor and Pylyshyn on Connectionism. Mind and Machines. Vol. 1. 1991. PP. 321-41
- APPLEBAUM, D.: Probability and Information: An Integrated Approach. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1996

- ARBIB, M.A.: Dynamics and Adaptation in Neural Networks. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 2nd Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 15-23
- ARGYRIS, J. / FAUST, G. / HAASE, M.: Die Erforschung des Chaos: Studienbuch für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1995
- ARNDT, Chr.: Information Measures. Information and its Description in Science and Engineering. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001
- ARROWSMITH, D.K. / PLACE, C.M.: An Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2001 (dt.: Dynamische Systeme. Mathematische Grundlagen. Spektrum Akademischer Verlag. Berlin u.a. 1994)
- ASHBY, W.R.: Design for a Brain. Chapman and Hall. London. 1952
- ATRAN, S. / MEDIN, D.: The Native Mind and the Cultural Construction of Nature. MIT Press. Cambridge/MA. 2008
- BAAS, N.A.: Emergence and Higher Order Structures. Proceedings of the Conference on Systems Research and Cybernetics. Baden-Baden. 1994
- BAAS, N.A.: Self-Organization and Higher Order Structures. In: F. SCHWEITZER (Ed.): Self-Organization of Complex Structures. From Individual to Collective Dynamics. Gordon & Breach. London. 1997. PP. 71-81
- BACHER, J. / PÖGE, A. / WENZIG, Kn.: Clusteranalyse. Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München. 2010
- BACKHAUS, KI. / ERICHSON, B. / PLINKE, W. / WEBER, R.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 12. Aufl. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2008
- BAK, P. / TANG, C. / WIESENFELD, K.: Self-Organized Criticality. An Explanation of the 1/f Noise. Physical Review Letters. Vol. 59. 1987. PP. 381-84
- BAK, P. / CHEN, K.: Selbstorganisierte Kritizität. Spektrum der Wissenschaft. Hf. 3. 1991. S. 62-71
- BALDUZZI, D. / TONONI, G.: Integrated Information in Discrete Dynamical Systems: Motivation and Theoretical Framework. PloS Computational Biology. Vol. 4. 2008. e1000091
From: doi: 10.1371/journal.pcbi.1000091
- BÁLINT, R.: Seelenlähmung des 'Schauens', optische Ataxie, räumliche Störung der Aufmerksamkeit. Monatsschriften für Psychiatrische Neurologie. Bd. 25. 1909. S. 51-81
- BARD ERMENTROUT, G. / TERMAN, D.H.: Mathematical Foundations of Neuroscience. Springer-Verlag. New York, London. 2010
- BARLOW, H.B.: Single Units and Sensation: A Neuron Doctrine for Perceptual Psychology. Perception. Vol. 1. 1972. PP. 371-94
- BARNDEN, J.A. / CHADY, M.: Artificial Intelligence and Neural Networks. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 113-17

- BARSALOU, L.W.: The Instability of Graded Structure: Implications for the Nature of Concepts. In: U. NEISSER (Ed.): Concepts and Conceptual Development: Ecological and Intellectual Factors in Categorization. Cambridge Univ. Press. Cambridge/UK. 1987. PP. 101-40
- BARSALOU, L.W.: Frames, Concepts, and Conceptual Fields. In: A. LEHRER / E.F. KITTAY (Eds.): Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Lexical and Semantic Organization. Erlbaum. Hillsdale/NY. 1992. PP. 21-74
- BARSALOU, L. W.: Perceptual Symbol Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 22. 1999. PP. 577-609
- BARSALOU, L.W.: Grounding Symbolic Operations in the Brain's Modal Systems. In: G.R. SEMIN / E.R. SMITH (Eds.): Embodied Grounding: Social, Cognitive, Affective, and Neuroscientific Approaches. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 9-42
- BARSALOU, L.W.: Grounded Cognition. Annual Review of Psychology. Vol. 59. 2008. PP. 617-45
- BARSALOU, L.W. / SIMMONS, W.K. / BARBEY, A.K. / WILSON, Chr.D.: Grounding Conceptual Knowledge in Modality-Specific Systems. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 7. 2003. PP. 84-91
- BARSALOU, L.W. / SANTOS, A. / SIMMONS, W.K. / WILSON, Chr.D.: Language and Simulation in Conceptual Processing. In: M. de VEGA / A.M. GLENBERG / A.C. GRAESSER (Eds.): Symbols and Embodiment. Debates on Meaning and Cognition. Oxford Univ. Press. New York. 2008. PP. 245-83
- BARTELS, A.: Visual Perception: Converging Mechanisms of Attention, Binding, and Sequention? Current Biology. Vol. 19. 2009. PP. R300-302
From: DOI: 10.1016/j.cub.2009.02.014
- BAŞAR, E.: Brain Function and Oscillations. I: Brain Oscillations, Principles and Approaches. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998
- BAŞAR, E.: Brain Function and Oscillations. II: Integrative Brain Function. Neurophysiology and Cognitive Processes. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999
- BAŞAR, E. / FLOHR, H. / HAKEN, H. / MANDELL, A.J. (Eds.): Synergetics of the Brain. Proceedings of the International Symposium on Synergetics at Schloß Elmau, Bavaria, May 2-7, 1983. Springer-Verlag. Berlin. u.a. 1983
- BAŞAR, E. / HAKEN, H.: Brain Function and Oscillations: Brain Oscillations, Principles and Approaches. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998
- BEAR, M.F. / CONNORS, B.W. / PARADISO, M.A.: Neuroscience. Exploring the Brain. 3rd Ed. Lippincott Williams & Wilkins. Baltimore/MD, Philadelphia/PA. 2007 (dt.: Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2009)
- BECHTEL, W.: Connectionism and the Philosophy of Mind: An Overview. In: T. HORGAN / J. TIENSON: Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. PP. 17-41 (reprinted in: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 30-59)

- BECHTEL, W.: Multiple Levels of Inquiry in Cognitive Science. *Psychological Research*. Vol. 52. 1990. PP. 271-81 (dt.: Multiple Ebenen der Analyse in der Kognitionswissenschaft. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): *Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung*. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 1- 27)
- BECHTEL, W.: Das Ende der Verbindung zwischen dem mentalen Bereich und der Sprache. Eine konnektionistische Perspektive. In: A. ELEPFANDT / G. WOLTERS_ (Hrsg.): *Denkmaschinen? Interdisziplinäre Perspektiven zum Thema Gehirn und Geist*. Universitätsverlag Konstanz. Konstanz. 1993. S. 117-52
- BECHTEL, W.: The Case for Connectionism. *Philosophical Studies*. Vol. 71. 1993. PP. 119-54 (reprinted in: W.G. LYCAN (Ed.): *Mind and Cognition. An Anthology*. 2nd Ed. Blackwell. Oxford/UK. 1999. PP. 153-70)
- BECHTEL, W.: Currents in Connectionism. *Minds and Machines*. Vol. 3. 1993. PP. 125-53
- BECHTEL, W.: Connectionism. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): *A Companion to the Philosophy of Mind*. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. PP. 200-10
- BECHTEL, W.: Natural Deduction in Connectionist Systems. *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 433-63
- BECHTEL, W.: What should a Connectionist Philosophy of Science Look Like? In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/ MA. 1995. PP. 121-44
- BECHTEL, W.: Embodied Connectionism. In: D. JOHNSON / C.E. ERNELING: *The Future of the Cognitive Revolution*. Oxford University Press. Oxford. 1997. PP. 187-208
- BECHTEL, W.: Representations and Cognitive Explanations: Assessing the Dynamicist Challenge in Cognitive Science. *Cognitive Science*. Vol. 22. 1998. PP. 295-318
- BECHTEL, W.: Representations: From Neural Systems to Cognitive Science. In: W. BECHTEL / P. MANDIK / J. MUNDALÉ / R. S. STUFFLEBEAM (Eds.): *Philosophy and the Neurosciences: A Reader*. Basil Blackwell. Oxford. 2001. PP. 332-48
- BECHTEL, W.: Mental Mechanisms: What are the Operations? In: Br.G. BARA / L. BARSALOU / M. BUCCIARELLI (Eds.): *Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. 2005. PP. 208-13
- BECHTEL, W.: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. Routledge. London. 2008
- BECHTEL, W.: *Constructing a Philosophy of Science of Cognitive Science. Topics in Cognitive Science*. Vol. 1. 2009. PP. 548-69
- BECHTEL, W.: Referring to Localized Cognitive Operations in Parts of Dynamically Active Brains. In: A. RAFTOPOULOS / P. MACHAMER (Eds.): *Perception, Realism and the Problem of Reference*. Cambridge University Press. Cambridge. 2012
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.A.: *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*. Blackwell Publishers. Oxford. 1991

- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.A.: Connectionism and the Future of Folk Psychology. In: R. BURTON (Ed.): *Minds: Natural and Artificial*. SUNY University Press. Albany/NY. 1993. PP. 69-100
- BECHTEL, W. / RICHARDSON, R.C.: *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*. Princeton University Press. Princeton/NJ. 1993
- BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Basil Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A. / GRAHAM, G.: The Life of Cognitive Science. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Basil Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. PP. 1-104
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.A.: *Connectionism and the Mind: Parallel Processing, Dynamics, and Evolution in Networks*. 2nd Ed. Blackwell Publishers. Oxford. 2002
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.A.: *Explanation: A Mechanistic Alternative*. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*. Vol. 36. 2005. PP. 421-41
- BECHTEL, W. / HERSCHBACH, M.: *Philosophy of the Cognitive Sciences*. In: Fr. ALLHOFF (Ed.): *Philosophy of the Sciences*. Blackwell. Oxford. 2010. PP. 237-61
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.A.: *Understanding the Brain as an Endogenously Active Mechanism*. In: St. OHLSSON / R. CATRAMBONE (Eds.): *Cognition in Flux*. Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Cognitive Science Society. Austin/TX. Cognitive Science Society. 2010. PP. 31-36
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.: *Dynamic Mechanistic Explanation: Computational Modeling of Circadian Rhythms as an Exemplar for Cognitive Science*. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*. Vol. 1. 2010. PP. 321-33
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.: *Complex Biological Mechanisms: Cyclic, Oscillatory, and Autonomous*. In: C.A. HOOKER (Ed.): *Philosophy of Complex Systems*. *Handbook of the Philosophy of Science*. Vol. 10. Elsevier. New York. 2011. PP. 257-85
- BECHTEL, W. / ABRAHAMSEN, A.: *Thinking Dynamically about Biological Mechanisms: Networks of Coupled Oscillators*. *Foundations of Science*. Springer Science+Business Media Dordrecht. 2012. PP. 1-19
From: DOI 10.1007/s10699-012-9301-z
- BECKERMANN, A.: *Einführung in die Logik*. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1997
- BECKERMANN, A.: *Analytische Einführung in die Philosophie des Geistes*. 3. Aufl. De Gruyter. Berlin u.a. 2008
- BEER, R.D.: *Dynamical Approaches to Cognitive Science*. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 4. 2000. PP. 91-99
- BENKER, H.: *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen*. Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXEL. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2003

- BERGER, A.: Chaos and Chance. An Introduction to Stochastic Aspects of Dynamics. De Gruyter. Berlin, New York. 2001
- BERKELEY, I.S.N.: Some Myths of Connectionism. The University of Southwestern Louisiana. Manuscript. 1997
From: <http://www.ucla.edu/~isb9112/dept/phil341/myths/myths.html>. PP. 1-14
- BERKELEY, I.S.N.: What the #*\$%! Is a Subsymbol ? Minds and Machines. Vol. 10. 2000. PP. 1-13
- BERKELEY, I.S.N. / DAWSON, M.R.W. / MEDLER, D.A. / SCHOPFLOCHER, D.P. / HORNSBY, L.: Density Plots of Hidden Value Unit Activations Reveal Interpretable Bands. Connection Science. Vol. 7. 1995. PP. 167-86
- BERMÚDEZ, J. / CAHEN, A.: Nonconceptual Content. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (March 16, 2011 Edition)
From: <http://plato.stanford.edu/entries/content-nonconceptual/>
- BERTALANFFY, L. von: The Theory of Open Systems in Physics and Biology. Science. Vol. 111. 1950. PP. 23-29
- BERTALANFFY, L. von: An Outline of General System Theory. British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1. 1950 (2010). PP. 134-65
- BERTALANFFY, L. von: Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme und ihre Anwendung in der Biologie. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn. Braunschweig. 1953
- BERTALANFFY, L. von: General System Theory. Foundations, Development, Applications. George Braziller. New York. 1968
- BERTALANFFY, L. von: The History and Status of General Systems Theory. In: G.J. KLIR (Ed.): Trends in General Systems Theory. Wiley-Interscience. New York, London. 1972. PP. 21-41
- BERTALANFFY, L. von: Zu einer allgemeinen Systemlehre. In: K. BLEICHER: Organisation als System. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 31-44 (wiederabgedruckt in: Kn. BLEICHER: Organisation als System. Gabler. Wiesbaden. 1972. S. 31-45)
- BERTALANFFY, L. von: Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. In: R. KURZROCK (Hrsg.): Systemtheorie. Colloquium Verlag. Berlin. 1972. S. 17-28
- BERTALANFFY, L. von: Perspectives on General System Theory. Scientific-Philosophical Studies. George Braziller. New York. 1975
- BERTALANFFY, L. von / RAPOPORT, A. (Eds.): General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956-2002
- BERTALANFFY, L. von / RAPOPORT, A.: General System Theory. In: L. von BERTALANFFY / A. RAPOPORT (Eds.): General Systems. Yearbook of the International Society for the Systems Sciences. Vol. 1. Wiley. Chichester, West Sussex. 1956. PP. 1-10
- BHATTI, M.A.: Practical Optimization Methods with Mathematical Applications. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000
- BIALEK, W. / RIEKE, Fr. / de RUYTER van STEVENINCK, R. / WARLAND, D.: Reading a Neural Code. Science. Vol. 252. 1991. PP. 1854-57

- BIANCI, L. / DORIGO, M. / GAMBARDELLA, L.M. / GUTJAHR, W.J.: A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization. *Natural Computing*. Vol. 8. 2009. PP. 239-87
- BIEDERLACK, J. / CASTELO, M. / NEUENSCHWANDER, S. / WHEELER, D.W. / SINGER, W. / NIKOLIC, D.: Brightness Induction: Rate Enhancement and Neural Synchronization as Complementary Codes. *Neuron*. Vol. 52. 2006. PP. 1073-83
- BIENENSTOCK, E.: A Model of Neocortex. *Network: Computation in Neural Systems*. Vol. 6. 1995. PP. 179-224
- BIENENSTOCK, E.: Composition. In: A. AERTSEN / V. BRAITENBERG (Eds.): *Brain Theory – Biological Basis and Computational Theory of Vision*. Elsevier. Amsterdam, New York. 1996. PP. 269-300
- BIENENSTOCK, E. / MALSBERG, Chr. von der: A Neural Network for Invariant Pattern Recognition. *Europhysics Letters*. Vol. 4. 1987. PP. 121-26
- BIRKHOFF, G.D.: *Dynamical Systems*. 1. Print of Rev. Ed. AMS. Providence/RI. 1927, 1966
- BLUM, Chr. / SOCHA, Kr.: Training Feed-Forward Neural Networks with Ant Colony Optimization: An Application to Pattern Classification. In: *Proceedings of the Fifth Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS)*, 6-9 November 2005. 2005. PP. 233-38
- BODÉN, M. / NIKLASSON, L.: Semantic Systematicity and Context in Connectionist Networks. *Connection Science*. Vol. 12. 2000. PP. 111-42
- BOLTZMANN, L.: *Vorlesungen über Gastheorie*. Barth Verlag. Leipzig. 1896
- BONNANS, J.F. / GILBERT, J.Ch. / LEMARÉCHAL, Cl. / SAGASTIZÁBAL, Cl.A.: *Numerical Optimization. Theoretical and Practical Aspects*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2003
- BORDA, M.: *Fundamentals in Information Theory and Coding*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011
- BORST, A. / THEUNISSEN, Fr.E.: Information Theory and Neural Coding. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 947-57
- BORTZ, J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. 5. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999
- BOSCH, S.: *Lineare Algebra*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001
- BOSCH, S.: *Algebra*. 6. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2006
- BOSSERT, M. / JORDAN, R. / FREUDENBERGER, J.: *Angewandte Informationstheorie. Vorlesungsmanuskript. Sommersemester 2002*
- BOTHE, H.-H.: *Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998
- BOVIER, A. / GAYRARD, V.: Statistical Mechanics of Neural Networks: The Hopfield Model and the Kac-Hopfield Model. *Markov Processes and Related Fields*. Vol. 3. 1997. PP. 392-422
- BOWERS, J.S.: On the Biological Plausibility of Grandmother Cells: Implications for Neural Network Theories in Psychology and Neuroscience. *Psychological Review*. Vol. 116. 2009. PP. 220-51

- BOWERS, J.S.: More on Grandmother Cells and the Biological Implausibility of PDP Models of Cognition: A Reply to Plaut and McClelland (2010) and Quian Quiroga and Kreiman (2010). *Psychological Review*. Vol. 117. 2010. PP. 300-308
- BRACHOLDT, S.: Bewertung von Clusterverfahren. Diplomarbeit. Fachbereich Informatik. Hochschule Mittweida. 2009
- BRAITENBERG, V.: Cell Assemblies in the Cerebral Cortex. In: R. HEIM / G. PALM (Eds.): *Theoretical Approaches to Complex Systems*. Springer-Verlag. Berlin. 1978. PP. 171-88
- BRAITENBERG, V.: *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press. Cambridge/MA. 1984
- BRAITENBERG, V. / SCHÜZ, A.: *Anatomy of the Cortex. Statistics and Geometry*. Springer-Verlag. Berlin, New York. 1991
- BRAUN, H. / FEULNER, J. / MALAKA, R.: *Praktikum Neuronale Netze*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1996
- BRAUSE, R.: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik*. B.G. Teubner. Stuttgart. 1995
- BRECHT, M. / ENGEL, A.K.: Cortico-Tectal Interactions in the Cat Visual System. In: Chr. von der MALSBERG / W. von SEELEN: *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'96)*. Bochum, Germany, July 16-19. 1996. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 1112/1996. Springer-Verlag. Berlin. 1996. PP. 395-99
- BRECHT, M. / SINGER, W. / ENGEL, A.K.: Correlation Analysis of Corticotectal Interactions in the Cat Visual System. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 80. 1998. PP. 2394-2407
- BRECHT, M. / SINGER, W. / ENGEL, A.K.: Patterns of Synchronization in the Superior Colliculus of Anesthetized Cats. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 19. 1999. PP. 3567-79
- BRECHT, M. / SINGER, W. / ENGEL, A.K.: Amplitude and Direction of Saccadic Eye Movements Depend on the Synchronicity of Collicular Population Activity. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 92. 2004. PP. 424-32
- BREEDLOVE, S.M. / ROSENZWEIG, M.R. / WATSON, N.V. (Eds.): *Biological Psychology. An Introduction to Behavioral, Cognitive, and Clinical Neuroscience*. 6th Ed. Sinauer Associates. Sunderland/MA. 2010
- BREIDBACH, O.: *Expeditionen ins Innere des Kopfes – Von Nervenzellen, Geist und Seele*. TRIAS-Verlag. Stuttgart, New York. 1993
- BREIDBACH, O.: Konturen einer Neurosemantik. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 9-29
- BREIDBACH, O.: Mustergestaltung und deren Ordnung in Neuronalen Netzen. In: W. HAHN / P. WEIBEL (Hrsg.): *Evolutionäre Symmetrietheorie. Selbstorganisation und dynamische Systeme*. S. Hirzel. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart. Stuttgart. 1996. S. 41-51
- BREIDBACH, O.: Denken in Neuronalen Netzen? In: Kl.-P. DENKER (Hrsg.): *Labile Ordnungen – Netze denken*. Verlag Hans-Bredow-Institut für Rundfunk und Fernsehen. Hamburg. 1997. S. 40-52

- BREIDBACH, O.: Bausteine zu einer Neurosemantik. In: G. RUSCH (Hrsg.): Wissen und Wirklichkeit – Beiträge zum Konstruktivismus. Eine Hommage an Ernst von Glasersfeld. Carl-Auer-Systeme. Heidelberg. 1999. S. 93-110
- BREIDBACH, O.: Internal Representations – A Prelude for Neurosemantics. The Journal of Mind and Behavior. Vol. 20. 1999. PP. 403-20
- BREIDBACH, O.: Neurologik? In: A. NEWEN / K. VOGLEY (Hrsg.): Selbst und Gehirn. MENTIS-Verlag. Frankfurt/M. 2000. S. 359-60
- BREIDBACH, O.: Neurosemantics, Neurons and System Theory. Theory in Biosciences. Vol. 126. 2007. PP. 23-33
- BREIDBACH, O. / HOLTHAUSEN, Kl.: Interne Repräsentation – Zur Analyse der Dynamik parallel verarbeitender Systeme. Jahrbuch für Geschichte und Theorie der Biologie. Bd. 3. 1996. S. 61-74
- BREIDBACH, O. / HOLTHAUSEN, Kl. / JOST, J.: Interne Repräsentationen – Über die „Welt“generierungseigenschaften des Nervengewebes. Prolegomena zu einer Neurosemantik. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): Repräsentationismus – was sonst? Braunschweig. 1996. S. 177-95
- BREMER, M. / COHNITZ, D.: Information and Information Flow. An Introduction. Ontos Verlag. Frankfurt am Main u.a. 2004
- BREWER, W.F.: Schemata. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 729-30
- BRILLOUIN, L.: Science and Information Theory. Academic Press. London. 1962
- BRIN, M. / STUCK, G.: Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 2002
- BRODY, C.D.: Correlations without Synchrony. Neural Computation. Vol. 11. 1999. PP. 1537-51
- BROOKS, R.A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol. 2. 1986. PP. 14-23.
- BROOKS, R.A.: Intelligence without Representation. Artificial Intelligence. Vol. 47. 1991. PP. 139-59
- BROOKS, R.A.: Cambrian Intelligence. The Early History of the New AI. MIT Press. Cambridge/MA. 1999
- BROSCH, M. / BAUER, R. / ECKHORN, R.: Synchronous High-Frequency Oscillations in Cat Area 18. European Journal of Neuroscience. Vol. 7. 1995. PP. 86-95
- BROWN, E.N. / KASS, R.E. / MITRA, P.P.: Multiple Neural Spike Train Data Analysis: State-of-the-Art and Future Challenges. Nature Neuroscience. Vol. 7. 2004. PP. 456-61
- BROWNE, A. / SUN, R.: Connectionist Variable Binding. Expert Systems. Vol. 16. 1999. PP. 189-207
- BRUCK, J.: On the Convergence Properties of the Hopfield Model. Proceedings of the IEEE. Vol. 78. 1990. PP. 1579-85

- BRUNEL, N. / NADAL, J.P.: Modeling Memory: What do we Learn from Attractor Neural Networks? In: Proceedings of Symposium: Memory, from Neuron to Cognition. Paris, April 17-18, 1997. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série III (Sciences de la Vie/Life Sciences). Vol. 321. 1998. PP. 249-52
- BRUNER, J.S.: The Course of Cognitive Growth. American Psychologist. Vol. 19. 1964. PP. 1-15
- BUCHER, Th.G.: Einführung in die angewandte Logik. Zweite, erweiterte Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1998
- BÜCHEL, Chr. / KARNATH, H.-O. / THIER, P.: Methoden der kognitiven Neurowissenschaften. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Aufl. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. S. 7-29
- BURG, Kl. / HAF, H. / WILLE, Fr. / MEISTER, A.: Höhere Mathematik für Ingenieure. Band III: Gewöhnliche Differentialgleichungen, Distributionen, Integraltransformationen. 5. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2009
- BUZSÁKI, G.: Rhythms of the Brain. Oxford University Press. Oxford, New York. 2006
- CALVO GARZÓN, Fr.: State Space Semantics and Conceptual Similarity: A Reply to Churchland. Philosophical Psychology. Vol. 13. 2000. PP. 77-95
- CALVO GARZÓN, Fr.: Connectionist Semantics and the Collateral Information Challenge. Mind & Language. Vol. 18. 2003. PP. 77-94
- CALVO GARZÓN, Fr.: Towards a General Theory of Antirepresentationalism. British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 59. 2008. PP. 259-92
- CAPURRO, R.: Information. Ein Beitrag zur etymologischen und ideengeschichtlichen Begründung des Informationsbegriffs. Verlag. Sauer. München. 1978
- CAPURRO, R.: On the Genealogy of Information. In: K. KORNWACHS / K. JACOBSON (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verlag. Berlin. 1996. PP. 259-70
- CAPURRO, R.: Das Capurrosche Trilemma. Ethik und Sozialwissenschaften. Vol. 9. 1998. PP. 188-89.
From: <http://dlist.sir.arizona.edu/2221/01/janich.htm>
- CAPURRO, R.: Einführung in den Informationsbegriff. 2000
From: <http://www.capurro.de/infovorl-index.htm>
- CAPURRO, R. / B. HJØRLAND: The Concept of Information. Annual Review of Information Science and Technology. Vol. 37. 2003. PP. 343-411
From: <http://www.capurro.de/infoconcept.html>.
- CARBON, Cl.-Chr.: Konnektionistische Systeme. Simuliertes „Bewußtsein“ oder Bewußtsein selbst? Magisterarbeit. Universität Trier. 1999
- CAREY, S.: Conceptual Change in Childhood. MIT Press. Cambridge. 1985
- CAREY, S.: Knowledge Acquisition: Enrichment or Conceptual Change. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 459-87
- CAREY, S.: The Origin of Concepts. Oxford University Press. Oxford. 2009
- CARNAP, R.: Der logische Aufbau der Welt. Meiner. Hamburg (1928) 1998
- CARNAP, R.: Logische Syntax der Sprache. Springer-Verlag. Wien. 1934

- CARNAP, R.: Formalization of Logic. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1943
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Vol. 37. 1987. PP. 54-115
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: ART 2: Stable Self-Organization of Pattern Recognition Codes for Analog Input Patterns. Applied Optics. Vol. 26. 1987. PP. 4919-30
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: The ART of Adaptive Pattern Recognition by a Self-Organizing Neural Network. Computer. Vol. 21. 1988. PP. 77-88
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: Self-Organizing Neural Network Architectures for Real-Time Adaptive Pattern Recognition. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. Academic Press. San Diego. 1990. PP. 455-78
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: Adaptive Resonance Theory. Neural Network Architectures for Self-Organizing Pattern Recognition. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): Parallel Processing in Neural Systems and Computers. Elsevier Science Inc. Amsterdam. 1990. PP. 383-89
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: ART 3: Hierarchical Search Using Chemical Transmitters in Self-Organizing Pattern Recognition Architectures. Neural Networks. Vol. 3. 1990. PP. 129-52
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: Pattern Recognition by Self-Organizing Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1991
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St. / REYNOLDS, J.H.: ARTMAP: Supervised Real-Time Learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-Organizing Neural Network. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 565-88
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St. / ROSEN, D.B.: Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 759-71
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St. / ROSEN, D.B.: ART 2-A: An Adaptive Resonance Algorithm for Rapid Category Learning and Recognition. Neural Networks. Vol. 4. 1991. PP. 493-504
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St. / ROSEN, D.B.: A Neural Network Realization of Fuzzy ART. Boston University. Technical Report. CAS/CNS-91-021. 1991. PP. 1-16
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: Adaptive Resonance Theory. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 87-90
- CARPENTER, G.A. / GROSSBERG, St.: Adaptive Resonance Theory. In: Cl. SAMMUT / G.I. WEBB (Eds.): Encyclopedia of Machine Learning. Springer Science + Business Media. New York. 2011. PP. 22-35
- CARRUTHERS, P.: Phenomenal Consciousness: A Naturalistic Theory. Cambridge University Press. New York. 2000

- CASTELO-BRANCO, M. / NEUENSCHWANDER, S. / SINGER, W.: Synchronization of Visual Responses Between the Cortex, Lateral Geniculate Nucleus, and Retina in the Anesthetized Cat. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 18. 1998. PP. 6395-6410
- CASTI, J.L.: *Dynamical System and Their Applications. Linear Theory*. Academic Press. New York u.a. 1977
- CASTI, J.L.: *Nonlinear System Theory*. Academic Press. Orlando/FLO, London. 1985
- CHAITIN, G.J.: Randomness and Mathematical Proof. *Scientific American*. Vol. 232. 1975. PP. 47-52
- CHALMERS, D.J.: Syntactic Transformations on Distributed Representations. *Connection Science*. Vol. 2. 1990. PP. 53-62
- CHALMERS, D.J.: Subsymbolic Computation and the Chinese Room. In: J. DINSMORE (Ed.): *The Symbolic and Connectionist Paradigms: Closing the Gap*. 1992. PP. 25-48
- CHALMERS, D.J.: Connectionism and Compositionality: Why Fodor and Pylyshyn were Wrong. *Philosophical Psychology*. Vol. 6. 1993. PP. 305-19
- CHEVALLIER, S. / PAUGAM-MOISY, H. / SEBAG, M.: Spike Ants, a Spiking Neuron Network Modelling the Emergence of Organization in a Complex System. In: J. LAFFERTY (Ed.): *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 23. 24th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'2010), 6-9 December 2010, Vancouver, Canada. 2010. PP. 379-87
- CHISHOLM, R.M.: Intentionality. In: D.M. BORCHERT (Ed.): *Encyclopedia of Philosophy*. 2nd Ed. Thomson Gale. Detroit u.a. 2006. PP. 704-708
- CHOMSKY, N.: *Syntactic Structures*. Mouton. The Hague/Paris. 1957
- CHOMSKY, N.: Verbal Behavior. *Language*. Vol. 35. 1959. PP. 26-58
- CHOMSKY, N.: *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press. Cambridge/MA. 1965
- CHOMSKY, N.: *Language and Mind*. Harcourt, Brace and World. New York. 1968
- CHRISLEY, R.L.: *Fluid Architecture: Connectionist Systematicity*. 2000
From: <http://www.cogs.susx.ac.uk/users/ronc/fluid.ps>
- CHRISLEY, R. / ZIEMKE, T.: Embodiment. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1102-1108
- CHU, D. / STRAND, R. / FJELLAND, R.: Theories of Complexity. *Common Denominators of Complex Systems*. *Complexity*. Vol. 8. 2003. PP. 19-30
- CHURCHLAND, P.M.: Some Reductive Strategies in Cognitive Neurobiology. *Mind*. Vol. 95. 1986. PP. 279-309
- CHURCHLAND, P.M.: *Cognitive Neurobiology: A Computational Hypothesis for Laminar-Cortex*. *Biology and Philosophy*. Vol. 1. 1986. PP. 25-51
- CHURCHLAND, P.M.: *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. The MIT Press / Bradford Books. Cambridge/MA. 1989

- CHURCHLAND, P.M.: State-Space Semantics and Meaning Holism. *Philosophy and Phenomenological Research*. Vol. 53. 1993. PP. 667-72
- CHURCHLAND, P.M.: *The Engine of Reason, the Seat of the Soul*. MIT Press. Cambridge/MA. 1995 (dt.: *Die Seelenmaschine. Eine philosophische Reise ins Gehirn*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 2001)
- CHURCHLAND, P.M.: *The Neural Representation of the Social World*. In: L. MAY / M. Friedman / A. CLARK (Eds.): *Mind and Morals: Essays on Cognitive Science and Ethics*. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 91-108
- CHURCHLAND, P.M.: *Conceptual Similarity across Sensory and Neural Diversity: The Fodor/Lepore Challenge Answered*. *The Journal of Philosophy*. Vol. 95. 1998. PP. 5-32
- CHURCHLAND, P.M.: *Neurosemantics: On the Mapping of Minds and the Portrayal of Worlds*. In: K.E. WHITE (Ed.): *The Emergence of the Mind. Proceedings of the International Symposium*. Milan. Montedison the Fondazione Carlo Erba. 2001. PP. 117-47 (reprinted in P.M. CHURCHLAND: *Neurophilosophy at Work*. Cambridge University Press. New York. 2007. PP. 126-60)
- CHURCHLAND, P.M.: *Outer Space and Inner Space: The New Epistemology*. *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*. Vol. 76. 2002. PP. 25-48
- CHURCHLAND, P.M.: *Neurophilosophy at Work*. Cambridge University Press. New York. 2007
- CHURCHLAND, P.M. / SMITH CHURCHLAND, P.: *Fodor and Lepore: State-Space Semantics and Meaning Holism*. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 272-77
- CHURCHLAND, P.M. / SMITH CHURCHLAND, P.: *Second Reply to Fodor and Lepore*. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 278-83
- CLAESGES, U.: *Intentionalität*. In: J. RITTER / K. GRÜNDER (Hrsg.): *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Bd. 4. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1976. S. 475
- CLARK, A.: *Microfunctionalism: Connectionism and the Scientific Explanation of Mental States. An Amended Version of Material (Ch. 1, 2, and 6) that first Appeared in: A. CLARK: Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1989. PP. 1-44*
- CLARK, A.: *Microcognition: Philosophy, Cognitive Science, and Parallel Distributed Processing. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1989*
- CLARK, A.: *Connectionism, Competence, and Explanation*. *British Journal of Philosophy*. Vol. 41. 1990. PP. 195-222 (reprinted in: M.A. BODEN: *The Philosophy of Artificial Intelligence*. Oxford. 1990. PP. 281-308)
- CLARK, A.: *Systematicity, Structured Representations and Cognitive Architecture: A Reply to Fodor and Pylyshyn*. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 198-218

- CLARK, A.: The Presence of a Symbol. *Connection Science*. Vol. 4. 1992. PP. 193-205
- CLARK, A.: *Associative Engines. Connectionism, Concepts, and Representational Change*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1993
- CLARK, A.: Superpositional Connectionism: A Reply to Marinov. *Minds and Machines*. Vol. 3. 1993. PP. 271-81
- CLARK, A.: Minimal Rationalism. *Mind*. Vol. 102. 1993. PP. 587-610
- CLARK, A.: Connectionist Minds. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD: *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995. PP. 339-56
- CLARK, A.: An Embodied Cognitive Science? *Trends in Cognitive Science*. Vol. 3. 1999. PP. 345-51
- CLARK, A.: *Mindware. An Introduction to the Philosophy of Cognitive Science*. Oxford Univ. Press. New York, Oxford. 2001
- CLARK, A.: *Supersizing the Mind. Embodiment, Action, and Cognitive Extension*. Oxford University Press. Oxford. 2008
- CLARK, A. / LUTZ, R. (Eds.): *Connectionism in Context*. Springer-Verlag. London u.a. 1992
- CLARK, A. / LUTZ, R.: Introduction. In: A. CLARK / R. LUTZ (Eds.): *Connectionism in Context*. Springer-Verlag. London u.a. 1992
- CLARK, A. / KARMILOFF-SMITH, A.: The Cognizer's Innards: A Philosophical and Psychological Perspective on the Development of Thought. *Mind and Language*. Vol. 8. 1993. PP. 487-519
- CLARK, A. / KARMILOFF-SMITH, A.: What's Special about the Development of the Human Mind/Brain. *Mind and Language*. Vol. 8. 1993. PP. 569-81
- CLARK, A. / TORIBIO, J.: Doing without Representing? *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 401-31
- CLARK, A. / THORNTON, Chr.: Trading Spaces: Computation, Representation and the Limits of Uninformed Learning. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 57-67
- CLARK, A. / THORNTON, Chr.: Author's Response: Relational Learning Re-examined. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 83-90
- CLARK, A. / ELIASMITH, Chr.: Philosophical Issues in Brain Theory and Connectionism. In: M. ARBIB (Ed.): *Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 2002. PP. 886-88
- CLARK, J.W.: Statistical Mechanics of Neural Networks. *Physics Reports*. Vol. 158. 1988. PP. 91-157
- CLEEREMANS, A. (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003
- COHEN, M.A. / GROSSBERG, St.: Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 13. 1983. PP. 815-26
- COHEN-TANNOUDJI, Cl. / DIU, B. / LALOË, Fr.: *Quantenmechanik*. Band 2. 4. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 2010

- CONKLIN, J. / ELIASMITH, Chr.: An Attractor Network Model of Path Integration in the Rat. *Journal of Computational Neuroscience*. Vol. 18. 2005. PP. 183-203
- COOLEN, A.C.C.: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks I – Statics. *Handbook of Biological Physics*. Vol. 4. 2001. PP. 553-618
- COOLEN, A.C.C.: Statistical Mechanics of Recurrent Neural Networks II – Dynamics. *Handbook of Biological Physics*. Vol. 4. 2001. PP. 619-84
- COPELAND, Br.J. (Ed.): *The Essential Turing: Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life plus The Secrets of Enigma*. Clarendon Press. Oxford University Press. Oxford. 2004
- COTTRELL, G.W.: Attractor Networks. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 253-62
- COTTRELL, G.W.: *Computational Cognitive Neuroscience (CNNBook)*. Wiki Textbook. 2011
From: <http://grey.colorado.edu/CompCogNeuro/index.php/CCNBook/-Main>
- COUZIN, I.: Collective Minds. *Nature*. Vol. 445. 2007. P. 715
- COUZIN, I. / FRANKS, N.R.: Self-Organized Lane Formation and Optimized Traffic Flow in Army Ants. *Proceeding of the Royal Society of London. Series B* 270. 2003. PP. 139-46
- COVER, Th.M. / THOMAS, J.A.: *Elements of Information Theory*. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Hoboken/NJ. 2006
- CRAMER, Fr.: *Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen*. 3. Aufl. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH. Stuttgart. (1988) 1989
- CRANE, R.: *The Mechanical Mind. A Philosophical Introduction to Minds, Machines and Mental Representations*. 2nd Ed. Penguin. London. 2003
- CRAVER, C.F.: *Explaining the Brain. Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2007
- CRAVER, C.F. / BECHTEL, W.: Mechanism and Mechanistic Explanation. In: S. SARKAR / J. PFEIFER (Eds.): *Philosophy of Science: An Encyclopedia*. Routledge. New York. 2006. PP. 469-78
- CRICK, Fr. / KOCH, Chr.: Towards a Neurobiological Theory of Consciousness. *Seminars in the Neurosciences*. Vol. 2. 1990. PP. 263-75
- CRICK, Fr. / KOCH, Chr.: A Framework for Consciousness. *Nature Neuroscience*. Vol. 6. 2003. 119-26
- CUMMINS, R.: Functional Analysis. *Journal of Philosophy*. Vol. 72. 1975. PP. 741-64
- CUMMINS, R.: *The Nature of Psychological Explanation*. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1983
- CUMMINS, R.: Systematicity. *Journal of Philosophy*. Vol. 93. 1996. PP. 591-614
- DAHLGRÜN, M.: *Concepts: Foundational Issues*. Dissertation. Universität Tübingen. Fakultät für Philosophie und Geschichte. Philosophisches Seminar. 2006

- DALENOORT, G.J. (Ed.): The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989
- DALENOORT, G.J.: The Paradigm of Self-Organization: Studies of Autonomous Systems. In: G.J. DALENOORT (Ed.): The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989. PP. 1-22
- DALENOORT, G.J.: Mechanisms of Self-Organization. In: G.J. DALENOORT (Ed.): The Paradigm of Self-Organization. Current Trends in Self-Organization. Gordon & Breach Science Publishers. Yverdon. 1989. PP. 298-308
- DAUXOIS, Th. / PEYRARD, M.: Physics of Solitons. Cambridge University Press. Cambridge. 2006
- DAVALO, E. / NAÏT, P.: Neural Networks. MacMillan. London. 1991
- DAVIES, M.: Knowledge of Rules in Connectionist Networks. In: D. MEMMI / Y.M. VISETTI (Eds.): Intellectica. Special Issue. No. 9-10: Modèles Connexionistes. 1990. PP. 81-126
- DAVIES, M.: Rules and Competence in Connectionist Networks. In: J.E. TILES / G.T. McKEE / G.C. DEAN (Eds.): Evolving Knowledge in Natural Science and Artificial Intelligence. Pitman. London. 1990. PP. 85-114
- DAVIES, M.: Concepts, Connectionism, and the Language of Thought. In: W. RAMSEY / S. STICH / D. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Pragmatics and Cognition. Vol. 2. 1994. PP. 229-56
- DAWSON, M.R.W.: Understanding Cognitive Science. Blackwell Publishers Inc. Malden/MA, Blackwell Publishers Ltd. Oxford/UK. 1998
- DAWSON, M.R.W.: Computer Modeling of Cognition: Levels of Analysis. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 635-38
- DAWSON, M.R.W. / MEDLER, D.A.: Alberta's Dictionary of Cognitive Science. 2010
From: http://www.bcp.psych.ualberta.ca/~mike/Pearl_Street/Dictionary/
- DAYAN, P. / HINTON, G.E. / NEAL, R.M.: The Helmholtz Machine. Neural Computation. Vol. 7. 1995. PP. 889-904
- DAYAN, P. / HINTON, G.E.: Varieties of Helmholtz Machines. Neural Networks. Vol. 9. 1996. PP. 1385-1403
- DAYAN, P. / ABBOTT, L.F.: Theoretical Neuroscience. Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems. The MIT Press. Cambridge/MA. 2001
- DEBENER, S. / HERRMANN, C.S. / KRANCZIOCH, C. / GEMBRIS, D. / ENGEL, A.K.: Top-Down Attentional Processing Enhances Auditory Evoked Gamma Band Activity. Neuroreport. Vol. 14. 2003. PP. 683-86
- de CALLATÿ, A.M.: Natural and Artificial Intelligence. Misconceptions about Brains and Neural Networks. Expanded Ed. North Holland Publishing Co. Amsterdam, New York. 1992
- deCHARMS, R.Chr. / MERZENICH, M.M.: Primary Cortical Representation of Sounds by the Coordination of Action-Potential Timing. Nature. Vol. 381. 1996. PP. 610-12

- DECHTER, R. : Constraint Satisfaction. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 195-97
- DECHTER, R. / ROSSI, Fr.: Constraint Satisfaction. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 793-800
- de KAMPS, M. / van der VELDE, Fr.: Neural Blackboard Architectures: The Realization of Compositionality and Systematicity in Neural Networks. Journal of Neural Engineering. Vol. 3. 2006. PP. 1-12
- DELEUZE, G.: David Hume. Campus. Frankfurt. 1997
- DELORME, A. / PERRINET, L. / THORPE, S.J.: Networks of Integrate-and-fire Neurons Using Rank Order Coding B: Spike Timing Dependent Plasticity and Emergence of Orientation Selectivity. Neurocomputing. Vol. 38-40. 2001. PP. 539-45
- DENNETT, D.: A Cure for the Common Code. In: D. DENNETT: Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology. 4. Aufl. MIT Press. Cambridge/MA. (1977, 1978) 1988. PP. 90-108
- DENNETT, D.Cl.: Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology. MIT Press. Cambridge/MA. 1978
- DENNETT, D.Cl.: Quining Qualia. In: W.G. LYCAN (Ed.): Mind and Cognition. A Reader. Blackwell. Oxford. 1990. PP. 519-47
- DENNETT, D.: The Intentional Stance. MIT Press. Cambridge/MA. 1990
- DER, R. / HERRMANN, J.M.: Script Dynamical Systems and Autonomous Agents. Part I: Theory of Dynamical Systems. Part II: Learning. Lecture Script. Leipzig University. Institute for Informatics. 2002
- DESIMONE, R. / ALBRIGHT, T.D. / GROSS, C.G. / BRUCE, C.: Stimulus-Selective Properties of Inferior Temporal Neurons in the Macaque. The Journal of Neuroscience. Vol. 4. 1984. PP. 2051-62
- DESIMONE, R. / UNGERLIEDER, L.G.: Neural Mechanisms of Visual Processing in Monkeys. In: F. BOLLER / J. GRAFMAN (Eds.): Handbook of Neuropsychology. Vol. 2. Chap. 1. Elsevier. Amsterdam. 1989. PP. 267-99
- DEVANEY, R.L.: An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. Second Edition. Addison-Wesley. New York u.a. 1994
- DEVER, J.: Compositionality. In: E. LEPORE / B. SMITH: The Oxford Handbook of Philosophy of Language. Oxford University Press. 2006. PP. 633-66
- de ZEEUW, G.: Auf der Suche nach Wissen. In: D. BAECKER (Hrsg.): Schlüsselwerke der Systemtheorie. Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden. 2005. S. 145-71
- DIETRICH, E.: Algorithm. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 11-12
- DIETRICH, R.: Statistical Mechanics of Neural Networks. Enhancement by Weighting of Examples. Shaker. Aachen. 2001
- DIEUDONNÉ, J.A.: The Work of Nicolas Bourbaki. American Mathematical Monthly. Vol. 77. 1970. PP. 134-45
- DINSMORE, J.: Thunder in the Gap. In: J. DINSMORE (Ed.): The Symbolic and

- Connectionist Paradigms: Closing the Gap. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 1-23
- DOLAN, Ch.P.: Tensor Manipulation Networks: Connectionist and Symbolic Approaches to Comprehension, Learning, and Planning. AI Laboratory Technical Report. University of California. Los Angeles/CA. 1989
- DOLAN, Ch.P. / SMOLENSKY, P.: Implementing a Connectionist Production System Using Tensor Products. In: D. TOURETZKY / G.E. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 265-72
- DOLAN, Ch.P. / SMOLENSKY, P. : Tensor Product Production System: A Modular Architecture and Representation. Connection Science. Vol. 1. 1989. PP. 53-68
- DONG, Y. / MIHALAS, S. / QIU, F. / von der HEYDT, R. / NIEBUR, E.: Synchrony and the Binding Problem in Macaque Visual Cortex. Journal of Vision. Vol. 8. 2008. PP. 1-16.
From: doi: 10.1167/8.7.30
- DORFFNER, G.: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI. B.G.Teubner. Stuttgart. 1991
- DORFFNER, G.: Radical Connectionism – a Neural Bottom-Up Approach to AI. In: G. DORFFNER (Ed.): Neural Networks and a New Artificial Intelligence. International Thomson Computer Press. London, Boston. 1997. PP. 93-132
- DORIGO, M. / MANIEZZO, V. / COLORNI, A.: Positive Feedback as a Search Strategy. Technical Report 91-016. Politecnico di Milano. Milano, Italy. 1991
- DORIGO, M. / MANIEZZO, V. / COLORNI, A.: Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. Vol. 26. 1996. PP. 29-41
- DORIGO, M. / GAMBARDELLA, L.M.: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 1. 1997. PP. 53-66
- DORIGO, M. / BONABEAU, E. / THERAULAZ, G.: Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press. New York. 1999
- DORIGO, M. / DI CARO, G.: The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic. In: D. CORNE / M. DORIGO / F. GLOVER (Eds.): New Ideas in Optimization. McGraw-Hill. London u.a. 1999. PP. 11-32
From: <http://www.perada.eu/documents/2009/the-ant-colony-optimization-meta-heuristic.pdf>
- DORIGO, M. / STÜTZLE, Th.: Ant Colony Optimization. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2004. PP. 1-23
- DOURSAT, R. / PETITOT, J.: Dynamical Systems and Cognitive Linguistics: Toward an Active Morphodynamical Semantics. Neural Networks. Vol. 18. 2005. PP. 628-38
- DRACK, M.: Ludwig von Bertalanffy's Early System Approach. Systems Research and Behavioral Science. Vol. 26. 2009. PP. 563-72
- DRAZIN, Ph.G. et al.: Solitons – An Introduction. Cambridge University Press. Cambridge. 2002
- DRETSKE, Fr.: Knowledge and the Flow of Information. MIT Press. Cambridge/MA.

1981

- DRETSKE, Fr.: Explaining Behaviour. Reasons in a World of Causes. MIT Press. Bradford Book. Cambridge/MA. 1991
- DREYFUS, H.L. / DREYFUS, St.E.: Mind over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer. Basil Blackwell. Oxford. 1986 (dt.: Künstliche Intelligenz. Von den Grenzen der Denkmaschine und dem Wert der Intuition. Rowohlt Taschenbuch Verlag. Reinbek bei Hamburg. 1987)
- DUCH, W.: Platonic Model of Mind as an Approximation to Neurodynamics. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1997. PP. 491-510
- DUCH, W.: Brain-Inspired Conscious Computing Architecture. The Journal of Mind and Behaviour. Vol. 26. 2005. PP. 1-22
- DUCH, W. / DIERCKSEN, G.H.F.: Feature Space Mapping as a Universal Adaptive System. Computer Physics Communications. Vol. 87. 1995. PP. 341-71
- DÜRSCHIED, Chr.: Syntax. Grundlagen und Theorien. Westdeutscher Verlag. Wiesbaden. 3. Aufl. 2005
- DUMMETT, M.: Frege: Philosophy of Language. 2nd. Ed. Harvard University Press. Cambridge. 1981
- DUNCAN, J. / HUMPHREYS, Gl.: Visual Search and Stimulus Similarity. Psychological Review. Vol. 96. 1989. PP. 433-58
- DUNCAN, J. / HUMPHREYS, Gl.: Beyond the Search Surface. Visual Search and Attentional Engagement. Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance. Vol. 18. 1992. PP. 578-88
- DYER, M.G.: Connectionism versus Symbolism in High-Level Cognition. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 382-416
- EBELING, W.: Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig. 1976
- EBELING, W.: Physik der Selbstorganisation und Evolution. Akademie-Verlag. Berlin. 1982. S. 37-64
- EBELING, W.: Chaos – Ordnung – Information. Selbstorganisation in Natur und Technik. Verlag Harri Deutsch. Frankfurt am Main u.a. 1989
- EBELING, W. / ENGEL, H. / HERZEL, H.: Selbstorganisation in der Zeit. Akademie-Verlag. Berlin. 1990
- EBELING, W. / FREUND, J. / SCHWEITZER, Fr.: Entropie – Information – Komplexität. SFB 230. Universität Stuttgart. Universität Tübingen. Stuttgart. 1995
- EBELING, W. / FREUND, J. / SCHWEITZER, Fr.: Komplexe Strukturen: Entropie und Information. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig. 1998
- ECKARDT, B. von: What is Cognitive Science? MIT Press. Cambridge/MA. 1993
- ECKARDT, B. von: Mental Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 527-29

- ECKARDT, B. von: Cognitive Science: Philosophical Issues. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 552-59
- ECKHORN, R. / BAUER, R. / JORDAN, W. / BROSCHE, M. / KRUSE, M. / MUNK, M. / REITBOECK, H.J. : Coherent Oscillations: A Mechanism for Feature Linking in the Visual Cortex? Multiple Electrode and Correlations Analyses in the Cat. Biological Cybernetics. Vol. 60. 1988. PP. 121-30
- ECKHORN, R. / SCHANZE, Th. / BROSCHE, M. / SALEM, W. / BAUER, R.: Stimulus-Specific Synchronisations in Cat Visual Cortex: Multiple Microelectrode and Correlation Studies from Several Cortical Areas. In: E. BAŞAR / T. BULLOCK (Eds.): Induced Rhythms in the Brain. Springer-Verlag. New York. 1992. PP. 47-80
- ECKHORN, R. / GAIL, A. / BRUNS, A. / GABRIEL, A. / AL-SHAIKHLI, B. / SAAM, M.: Phase Coupling Supports Associative Visual Processing – Physiology and Related Models. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. 2007. PP. 169-87 (wiederabgedruckt in C. ALLEFELD / P. beim GRABEN / J. KURTHS (Eds.): Dynamical Systems Approaches to Language. Nova Science Publishers. New York. 2008. PP. 31-50)
- EDELMAN, G.M.: Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books. New York. 1987 (dt.: Unser Gehirn – ein dynamisches System: die Theorie des neuronalen Darwinismus und die biologischen Grundlagen der Wahrnehmung. Piper Verlag. München. 1993)
- EDELMAN, G.M. / TONONI, G.: A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination. Basic Books. New York. 2000 (dt.: Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. Beck. München. 2002)
- EDELMAN, Sh. / INTRATOR, N.: Object Structure, Visual Processing. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 797-800
- EDLINGER, K.: Evolution und Integration lebender Systeme: Aggregation oder Binnendifferenzierung. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 51-54
- EIGEN, M.: Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften. Vol. 58. 1971. PP. 465-523
- EIGEN, M.: Molecular Self-Organization and the Early Stages of Evolution. Quarterly Reviews of Biophysics. Vol. 4. 1971. PP. 149-212
- EIGEN, M.: Stufen zum Leben. Die frühe Evolution im Visier der Molekularbiologie. Piper. München u.a. 1987
- EIGEN, M.: Selection and the Origin of Information. In: O. SPORNIS / G. TONONI (Eds.): Selectionism and the Brain. International Review of Neurobiology. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 35-46
- EIGEN, M. / SCHUSTER, P.: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part A: Emergence of the Hypercycle. Naturwissenschaften. Bd. 64. 1977. PP. 541-65

- EIGEN, M. / SCHUSTER, P.: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part B: The Abstract Hypercycle. *Naturwissenschaften*. Bd. 65. 1978. PP. 7-41
- EIGEN, M. / SCHUSTER, P.: The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization. Part C: The Realistic Hypercycle. *Naturwissenschaften*. Bd. 65. 1978. PP. 341-69
- EIGEN, M. / SCHUSTER, P.: The Hypercycle. A Principle of Natural Selforganization. Springer-Verlag. 1979
- EILENBERGER, G.: Komplexität. Ein neues Paradigma der Naturwissenschaften. In: H. von DITFURTH / E.P. FISCHER (Hrsg.): *Mannheimer Forum 1989/90. Ein Panorama der Naturwissenschaften*. Piper. München. 1990. S. 71-134
- ELIASMITH, Chr.: The Third Contender: A Critical Examination of the Dynamicist Theory of Cognition. *Philosophical Psychology*. Vol. 9. 1996. PP. 441-63 (reprinted in: P. THAGARD (Ed.): *Mind Readings: Introductory Selections in Cognitive Science*. MIT Press. Cambridge/MASS. 1998. PP. 303-36)
- ELIASMITH, Chr.: Dynamical Models and van Gelder's Dynamicism: Two Different Things. Commentary in: T. van GELDER: *The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 21. 1998. PP. 615-28
- ELIASMITH, Chr.: How Neurons Mean – A Neurocomputational Theory of Representational Content. Dissertation. Department of Philosophy. Washington University in St. Louis. 2000
- ELIASMITH, Chr.: Learning Context Sensitive Logical Inference in a Neurobiological Simulation. In: S. LEVY / R. GAYLER (Eds.): *AAAI Fall Symposium: Compositional Connectionism in Cognitive Science*. AAAI Press. 2004. PP. 17-20
- ELIASMITH, Chr.: A Unified Approach to Building and Controlling Spiking Attractor Networks. *Neural Computation*. Vol. 17. 2005. PP. 1276-1314
- ELIASMITH, Chr.: Cognition with Neurons. A Large-Scale, Biologically Realistic Model of the Wason Task. In: G. BARA / L. BARSALOU / M. BUCCIARELLI (Eds.): *Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Stresa/ Piedmont, Italy. July 21-23, 2005. 2005. PP. 1-6
From: http://www.arts.uwaterloo.ca/~raha/CogSci600_web/Readings-S05/eliasmith2.pdf
- ELIASMITH, Chr.: Neurosemantics and Categories. In: C. LEFEBVRE / H. COHEN (Eds.): *Handbook of Categorization in Cognitive Science*. Elsevier. Amsterdam. 2006. PP. 1035-54
- ELIASMITH, Chr.: Neurocomputational Models. Theory and Applications. In: J. BICKLE (Eds.): *Oxford Handbook of Philosophy of Neuroscience*. Oxford University Press. Oxford. 2009. PP. 346-69
- ELIASMITH, Chr. / WESTOVER, M.B. / ANDERSON, C.H.: A General Framework for Neurobiological Modeling: An Application to the Vestibular System. *Neurocomputing*. Vol. 46. 2002. PP. 1071-76
- ELIASMITH, Chr. / ANDERSON, C.H.: *Neural Engineering: Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems*. MIT Press. Cambridge/MA. 2003

- ELIASMITH, Chr. / BECHTEL, W.: Symbolic versus Subsymbolic. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 288-95
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: Synchrony State Generation in Artificial Neural Networks with Stochastic Synapses. ICANN 2009. Part I. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5768. Springer-Verlag. Heidelberg. 2009. PP. 181-90
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: Predicting Spike-Timing of a Thalamic Neuron Using a Stochastic Synaptic Model. Proceedings of the European Symposium on Artificial Neural Networks. Computational Intelligence and Machine Learning. Bruges (Belgium), 28-30 April 2010. PP. 357-62
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: A Hebbian-Based Reinforcement Learning Framework for Spike-Timing-Dependent Synapses. In: K. DIAMANTARAS / Wl. DUCH / L.S. ILIADIS (Eds.): Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'2010). Part II. Thessaloniki, Greece. September 15-18, 2010. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6353/2010. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010. PP. 160-69
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: Synchrony State Generation: An Approach Using Stochastic Synapses. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research. Vol. 1. 2011. PP. 17-25
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: A Hypothetical Free Synaptic Energy Function and Related States of Synchrony. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21th International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 40-47
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: A Reinforcement Learning Framework for Spiking Networks with Dynamic Synapses. Journal of Computational Intelligence and Neuroscience. Vol. 2011. Doi: 10.1155/2011/869348. PP. 1-12
- EL-LAITHY, K. / BOGDAN, M.: On the Capacity of Transient Internal States of Synchrony in Liquid State Machines. In: T. HONKELA (Ed.): Proceedings of the 21th International Conference on Artificial Neural Networks and Machine Learning (ICANN'2011). Part II. Espoo, Finland. June 14-17, 2011. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 6792/2011. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 56-63
- ELMAN, J.L.: Finding Structure in Time. Cognitive Science. Vol. 14. 1990. PP. 179-211
- ELMAN, J.L.: Language as a Dynamical System. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 195-225
- ELMAN, J.L.: Connectionism, Artificial Life, and Dynamical Systems. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA., Oxford/UK. 1998
- ELMAN, J.L.: Connectionist Models of Cognitive Development: Where Next? Trends in Cognitive Sciences. Vol. 9. 2005. PP. 111-17

- ELMAN, J.L. / BATES, E.A. / JOHNSON, M.H. / KARMILOFF-SMITH, A. / PARISI, D. / PLUNKETT, K.: Rethinking Innateness. A Connectionist Perspective on Development. MIT Press. Cambridge/MA. 1998
- ELSTNER, D.: Information als Prozeß. TripleC – Cognition, Communication, Cooperation. Vol. 8. 2010. S. 310-50
- ENGEL, A.K.: Zeitliche Kodierung in neuronalen Netzen: Evidenz für kohärente Aktivität im Sehsystem. LIT Verlag. Münster. 1996
- ENGEL, A.K.: Prinzipien der Wahrnehmung: Das visuelle System. In: G. ROTH / W. PRINZ (Hrsg.): Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996. S. 181-207
- ENGEL, A.K.: Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In: Chr.S. HERRMANN / M. PAUEN / J.W. RIEGER / S. SCHICKTANZ (Hrsg.): Bewusstsein – Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik. Wilhelm Fink Verlag. München. 2005. S. 16-41
- ENGEL, A.K.: Neuronale Grundlagen der Merkmalsintegration. In: H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Neuropsychologie. 2. Ed. Springer-Verlag. Heidelberg. 2006. PP. 55-65 (wiederabgedruckt in H.-O. KARNATH / P. THIER (Hrsg.): Kognitive Neurowissenschaften. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2012. PP. 67-77)
- ENGEL, A.K.: Gamma Oscillations. In: P. WILKEN / A. CLEEREMANS / T. BAYNE (Eds.): Oxford Companion to Consciousness. Oxford Univ. Press. Oxford. 2009. PP. 321-27
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / GRAY, Ch.M. / SINGER, W.: Stimulus-Dependent Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex: Inter-Columnar Interaction as Determined by Cross-Correlation Analysis. European Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1990. PP. 588-606
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / GRAY, Ch.M. / SINGER, W.: Synchronization of Oscillatory Responses: A Mechanism for Stimulus-Dependent Assembly Formation in Cat Visual Cortex. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): Parallel Processing in Neural Systems and Computers. Elsevier Science Inc. New York. 1990. PP. 105-108
- ENGEL, A.K. / KREITER, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses between Striate and Extrastriate Visual Cortical Areas of the Cat. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 88. 1991. PP. 6048-52
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / KREITER, A.K. / SINGER, W.: Interhemispheric Synchronization of Oscillatory Neuronal Responses in Cat Visual Cortex. Science. Vol. 252. 1991. PP. 1177-79
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Direct Physiological Evidence for Scene Segmentation by Temporal Coding. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 88. 1991. PP. 9136-40
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / KREITER, A.K. / SCHILLEN, T.B. / SINGER, W.: Temporal Coding in the Visual Cortex: New Vistas on Integration in the Nervous System. Trends in Neuroscience. Vol. 15. 1992. PP. 218-26
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Bildung repräsentationaler Zustände im Gehirn. In: Spektrum der Wissenschaften. Hf. 9. 1993. S. 42-47

- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P.: Der Aufbau neuronaler Repräsentationen im Sehsystem. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 122-52
- ENGEL, A.K. / SINGER, W.: Neuronale Grundlagen der Gestaltwahrnehmung. In: Spektrum der Wissenschaften. Dossier 4/97 „Kopf und Computer“. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1997. S. 66-73
- ENGEL, A.K. / KÖNIG, P.: Das neurobiologische Wahrnehmungsparadigma. Eine kritische Bestandsaufnahme. In: P. GOLD / A.K. ENGEL (Hrsg.): Der Mensch in der Perspektive der Kognitionswissenschaften. Suhrkamp. Frankfurt/M. 1998. S. 157-94
- ENGEL, A.K. / BRECHT, M. / FRIES, P. / SINGER, W.: Zeitliche Bindung und der Aufbau visueller Objektrepräsentationen. In: U. KOTKAMP / W. KRAUSE (Hrsg.): Intelligente Informationsverarbeitung. Deutscher Universitätsverlag. Wiesbaden. 1998. S. 193-200
- ENGEL, A.K. / FRIES, P. / KÖNIG, P. / BRECHT, M. / SINGER, W.: Temporal Binding, Binocular Rivalry, and Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 128-51
- ENGEL, A.K. / FRIES, P. / KÖNIG, P. / BRECHT, M. / SINGER, W.: Does Time Help to Understand Consciousness. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 260-68
- ENGEL, A.K. / FRIES, P. / SINGER, W.: Dynamic Predictions: Oscillations and Synchrony in Top-Down Processing. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 2. 2001. PP. 704-16
- ENGEL, A.K. / SINGER, W.: Temporal Binding and the Neural Correlates of Sensory Awareness. *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 5. 2001. PP. 16-25
- ENGEL, A. / van den BROECK, Chr.: *Statistical Mechanics of Learning*. Cambridge University Press. Cambridge. 2001
- ENGELKAMP, J. / PECHMANN, T.: Kritische Anmerkungen zum Begriff der mentalen Repräsentation. In: J. ENGELKAMP / T. PECHMANN (Hrsg.): *Mentale Repräsentation*. Huber Verl. Bern. 1993. S. 7-16
- ENGELKAMP, J. / ZIMMER, H.D.: *Lehrbuch der kognitiven Psychologie*. Hogrefe. Göttingen u.a. 2006
- ENGELS, E.-M.: *Erkenntnis als Anpassung? Eine Studie zur Evolutionären Erkenntnistheorie*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1989
- ENGLER, F.O. / IVEN, M. (Hrsg.): *Moritz Schlick. Leben, Werk und Wirkung*. Parerga. Berlin 2008
- ERASSME, R.: *Der Mensch und die „Künstliche Intelligenz“*. Eine Profilierung und kritische Bewertung der unterschiedlichen Grundauffassungen vom Standpunkt des gemäßigten Realismus. 2002
From: Psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/102/.
- ERK, K. / PRIESE, L.: *Theoretische Informatik. Eine umfassende Einführung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000
- ERMENTROUT, B.: An Introduction to Neural Oscillators. In: Fr. VENTRIGLIA (Ed.): *Neural Modeling and Neural Networks*. Pergamon Press. Oxford u.a. 1994. PP. 79-110

- ERMENTROUT, B.: Neural Networks as Spatio-Temporal Pattern-Forming Systems. Reports on Progress in Physics. Vol. 61. 1998. PP. 353-430
- ERMENTROUT, B. / KOPELL, N.: Frequency Plateaus in a Chain of Weakly Coupled Oscillators. In: J. SMOLLER (Ed.): Nonlinear Partial Differential Equations. American Mathematical Society. Providence/RI. 1982. PP. 401-404 (reprinted in Siam Journal on Mathematical Analysis. Vol. 15. 1984. PP. 215-37)
- ESTEP, M.: Self-Organizing Natural Intelligence. Issues of Knowing, Meaning, and Complexity. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006
- EVERITT, Br. / LANDAU, S. / LEESE, M.: Cluster Analysis. 4th Ed. Edward Arnold. London. 2001
- FANG, F. / BOYACI, H. / KERSTEN, D.: Border Ownership Selectivity in Human Early Visual Cortex and its Modulation by Attention. Journal of Neuroscience. Vol. 29. 2009. PP. 460-65
- FARMER, S.F.: Rhythmicity, Synchronization and Binding in Human and Primate Motor Systems. Journal of Physiology. Vol. 509. 1998. PP. 3-14
- FEIGE, B. / AERTSEN, A. / KRISTEVA-FEIGE, R.: Dynamic Synchronization Between Multiple Motor Areas and Muscle Activity in Phasic Voluntary Movements. Journal of Neurophysiology. Vol. 84. 2000. PP. 2622-29
- FELDMAN, J.A.: A Connectionist Model of Visual Memory. In: G.E. HINTON / J.A. ANDERSON (Eds.): Parallel Models of Associative Memory. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989. PP. 49-81
- FELDMAN, J.A. / BALLARD, D.H.: Connectionist Models and their Properties. Cognitive Science. Vol. 6. 1982. PP. 205-54
- FELDMAN, J.A. / SHASTRI, L.: Connectionism. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 680-87
- FELTZ, B.: Self-Organization, Selection and Emergence in the Theories of Evolution. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 341-60
- FENZL, N. / FLEISSNER, P. / HOFKIRCHNER, W. / JAHN, R. / STOCKINGER, G.: On the Genesis of Information Structures: A View that is neither Reductionist nor Holistic. In: K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verlag. Berlin. 1996. PP. 271-83
- FETZ, R.L.: Struktur und Genese. Jean Piagets Transformation der Philosophie. Haupt. Bern u.a. 1988
- FETZER, J.H.: Connectionism and Cognition: Why Fodor and Pylyshyn are wrong. In: A. CLARK / R. LUTZ (Eds.): Connectionism in Context. Springer-Verlag. London u.a. 1992. PP. 37-56
- FICKEL, U.: Zeitliche Muster neuronaler Aktivität. Stimulusgekoppelte und intrinsisch generierte Komponenten. Dissertation. Universität Hamburg. 2007
- FISCHER, B.: A Model of the Computations Leading to a Representation of Auditory Space in the Midbrain of the Barn Owl. PhD Thesis. Washington University St. Louis. 2005

- FISCHER, H. / KAUL, H.: *Mathematik für Physiker 2: Gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen, mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. 3. Aufl. Teubner. Wiesbaden. 2008
- FITZHUGH, R.: *Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane*. *Biophysical Journal*. Vol. 1. 1961. PP. 445-66
- FLEISSNER, P. / HOFKIRCHNER, W.: *In-formatio Revisited: Wider dem dinglichen Informationsbegriff*. *Informatik Forum*. Vol. 8. 1995. S. 126-31
- FLETCHER, R.: *Practical Methods of Optimization*. 2nd Ed. Wiley. Chichester. 1987
- FODOR, J.A.: *The Language of Thought*. Harvester Press. Sussex. 1976
- FODOR, J.A.: *Methodological Solipsism Considered as a Research Strategy in Cognitive Psychology*. *The Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 3. 1980. PP. 63-109
- FODOR, J.A.: *Three Cheers for Propositional Attitudes*. In: J.A. FODOR: *Representations*. MIT Press. Cambridge/MA. 1981. PP. 100-23
- FODOR, J.A.: *Propositional Attitudes*. In: J.A. FODOR: *Representations*. MIT Press. Cambridge/MA. 1981. PP. 177-203
- FODOR, J.A.: *The Modularity of Mind*. MIT Press. Cambridge/MA. 1983
- FODOR, J.A.: *Psychosemantics*. MIT Press. Cambridge/MA. 1987
- FODOR, J.A.: *A Theory of Content and other Essays*. MIT Press. Cambridge/MA. 1990
- FODOR, J.A.: *A Theory of Content, I: The Problem*. In: J.A. FODOR: *A Theory of Content and other Essays*. MIT Press. Cambridge/MA. 1990. PP. 51-87
- FODOR, J.A.: *A Theory of Content, II: The Theory*. In: J.A. FODOR: *A Theory of Content and other Essays*. MIT Press. Cambridge/MA. 1990. PP. 89-136
- FODOR, J.A.: *Information and Representation*. In: P. HANSON (Ed.): *Information, Language and Cognition*. University of British Columbia Press. 1990. PP. 175-90
- FODOR, J.A.: *Connectionism and the Problem of Systematicity (continued): Why Smolensky's Solution still doesn't work*. *Cognition*. Vol. 62. 1997. PP. 109-19
- FODOR, J.A.: *Concepts: Where Cognitive Science Went Wrong*. Clarendon Press. Oxford. 1998
- FODOR, J.A.: *Hume Variations*. Oxford University Press. Oxford. 2003
- FODOR, J.A.: *LOT 2: The Language of Thought Revisited*. Oxford University Press. New York. 2008
- FODOR, J.A. / PYLYSHYN, Z.W.: *How Direct is Visual Perception?: Some Reflections on Gibson's „Ecological Approach“*. *Cognition*. Vol. 9. 1981. PP. 139-96
- FODOR, J.A. / PYLYSHYN, Z.W.: *Connectionism and Cognitive Architecture: A Critical Analysis*. *Cognition*. Vol. 28. 1988. PP. 3-71
- FODOR, J.A. / McLAUGHLIN, Br.P.: *Connectionism and the Problem of Systematicity: Why Smolensky's Solution Doesn't Work*. *Cognition*. Vol. 35. 1990. PP. 183-204 (reprinted in: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995. PP. 199-222)
- FODOR, J.A. / LEPORE, E.: *Holism: A Shopper's Guide*. Blackwell. Cambridge.

1992

- FODOR, J.A. / LEPORE, E.: Paul Churchland and State Space Semantics. In: R. McCAULEY: *The Churchlands and their Critics*. Blackwell. Cambridge/MA. 1995. PP. 145-62
- FODOR, J. / LEPORE, E.: The Red Herring and the Pet Fish: Why Concepts still can't be Prototypes. *Cognition*. Vol. 58. 1996. PP. 253-70
- FODOR, J.A. / LEPORE, E.: All at Sea in Semantic Space: Churchland on Meaning Similarity. *Journal of Philosophy*. Vol. 96. 1999. PP. 381-403
- FOSS, J.: The Percept and Vector Function Theories of the Brain. *Philosophy of Science*. Vol. 55. 1988. PP. 511-37
- FRANÇOIS, Ch.: Systemics and Cybernetics in a Historical Perspective. *Systems Research and Behavioral Science*. Vol. 16. 1999. PP. 203-19
- FRANK, St.L. / HASELAGER, W.F.G.: Robust Semantic Systematicity and Distributed Representations in a Connectionist Model of Sentence Comprehension. In: R. SUN / N. MIYAKE (Eds.): *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Mahwah/NJ. 2006. PP. 226-31
- FREEMAN, W.J.: Waves, Pulses and the Theory of Neural Masses. *Progress in Theoretical Biology*. Vol. 2. 1972. PP. 87-165
- FREEMAN, W.J.: *Mass Action in the Nervous System. Examination of the Neurophysiological Basis of Adaptive Behavior through the EEG*. Academic Press. New York u.a. 1975
- FREEMAN, W.J.: Spatial Properties of an EEG Event in the Olfactory Bulb and Cortex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. Vol. 44. 1978. PP. 586-605 (reprinted in: W.J. FREEMAN (Ed.): *Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics*. Springer-Verlag. London/UK. 2000. PP. 211-39)
- FREEMAN, W.J.: Simulation of Chaotic EEG Patterns with a Dynamic Model of the Olfactory System. *Biological Cybernetics*. Vol. 56. 1987. PP. 139-50
- FREEMAN, W.J.: *Societies of Brains. A Study in the Neuroscience of Love and Hate*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1995
- FREEMAN, W.J.: *How Brains Make up their Minds*. Columbia University Press. New York. 2000
- FREEMAN, W.J. (Ed.): *Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics*. Springer-Verlag. London/UK. 2000
- FREEMAN, W.J.: A Neurobiological Theory of Meaning in Perception. Part 1. Information and Meaning in Nonconvergent and Nonlocal Brain Dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2493-2511
- FREEMAN, W.J.: A Neurobiological Theory of Meaning in Perception. Part 2. Spatial Patterns of Phase in Gamma EEG from Primary Sensory Cortices Reveal the Properties of Mesoscopic Wave Packets. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 13. 2003. PP. 2513-35
- FREEMAN, W.J. / SCHNEIDER, W.: Changes in Spatial Patterns of Rabbit EEG with Conditioning to Odors. *Psychophysiology*. Vol. 19. 1982. PP. 44-56

- FREEMAN, W.J. / VIANA DI PRISCO, G.: EEG Spatial Pattern Differences with Discriminated Odors Manifest Chaotic and Limit Cycle Attractors in Olfactory Bulb of Rabbits. In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): Brain Theory. Springer-Verlag. Berlin. 1986. PP. 97-119 (reprinted in: W.J. FREEMAN (Ed.): Neurodynamics: An Exploration of Mesoscopic Brain Dynamics. Springer-Verlag. London/UK. 2000. PP. 265-90)
- FREGE, G.: Begriffsschrift: eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens. Halle. 1879. In: I. ANGELELLI (Hrsg.): G. Frege: Begriffsschrift und andere Aufsätze. 2. Aufl. Wiss. Buchgesellschaft. Darmstadt. 1973
- FREGE, G.: Über Sinn und Bedeutung. In: G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Funktion, Begriff und Bedeutung. Fünf logische Studien. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1892) 1962. S. 40-65
- FREGE, G. (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966
- FREGE, G.: Logische Untersuchungen. Dritter Teil: Gedankengefüge. Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus. Hf. 3. 1923-26. S. 36-51 (wiederabgedruckt in G. FREGE (G. PATZIG (Hrsg.)): Logische Untersuchungen. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. (1923) 1966. S. 72-91, v.a. S. 72)
- FREGE, G.: Compound Thoughts. In: P. GEACH / R.H. STOOHOFF (Eds. and Trans.): Logical Investigations. Gottlob Frege. Basil Blackwell. Oxford. (1923) 1976. PP. 55-78
- FREIWALD, W.A. / KREITER, A.K. / SINGER, W.: Synchronization and Assembly Formation in the Visual Cortex. In: M.A.L. NICOLELLIS (Ed.): Advances in Neural Population Coding. Elsevier. Amsterdam. 2001. PP. 111-40
- FRENCH, R.M.: Catastrophic Forgetting in Connectionist Networks. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 431-35
- FREUND, A.M. / HUETT, M.-Th. / VEC, M.: Selbstorganisation: Aspekte eines Begriffs- und Methodentransfers. Systeme. Jg. 18. H. 1. 2004 (wiederabgedruckt in: M. VEC / M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 12-32)
- FREY, Th. / BOSSERT, M.: Signal- und Systemtheorie. 2. korr. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden. 2008
- FRIEN, A. / ECKHORN, R. / BAUER, R. / WOELBERN, T. / KEHR, H.: Stimulus-Specific Fast Oscillations at Zero Phase Between Visual Areas V1 and V2 of Awake Monkey. Neuroreport. Vol. 5. 1994. PP. 2273-77
- FRIES, P. / ROELFSEMA, P.R. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Synchronization of Oscillatory Responses in Visual Cortex Correlates with Perception in Interocular Rivalry. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 94. 1997. PP. 12699-704
- FRIES, P. / REYNOLDS, J.H. / RORIE, A.E. / DESIMONE, R.: Modulation of Oscillatory Neuronal Synchronization by Selective Visual Attention. Science. Vol. 291. 2001. PP. 1560-63

- FRIES, P. / SCHRÖDER, J.-H. / ROELFSEMA, P.R. / SINGER, W. / ENGEL, A.K.: Oscillatory Neuronal Synchronization in Primary Visual Cortex as a Correlate of Stimulus Selection. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 22. 2002. PP. 3739-54
- FRIES, P. / NIKOLIĆ, D. / SINGER, W.: The Gamma Cycle. *Trends in Neurosciences*. Vol. 30. 2007. PP. 309-16
- FRISTON, K.J.: Another Neural Code? *Neuroimage*. Vol. 5. 1997. PP. 213-20
- FRISTON, K.: Learning and Inference in the Brain. *Neural Networks*. Vol. 16. 2003. PP. 1325-52
- FRISTON, K.: The Free-Energy Principle: A Rough Guide to the Brain? *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 13. 2009. PP. 293-301
- FRISTON, K.: The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 11. 2010. PP. 127-38
- FRISTON, K.: Is the Free-Energy Principle Neurocentric? *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 11. 2010. P. 605
From: doi:10.1038/nrn2787-c2
- FRISTON, K.: The History of the Future of the Bayesian Brain. *NeuroImage*. Vol. 62. 2012. PP. 1230-33
- FRISTON, K. / KILNER, J. / HARRISON, L.: A Free Energy Principle for the Brain. *Journal of Physiology Paris*. Vol. 100. 2006. PP. 70-87
- FRISTON, K. / STEPHAN, K.I.E.: Free-Energy and the Brain. *Synthese*. Vol. 159. 2007. PP. 417-58
- FRISTON, K.J. / TRUJILLO-BARRETO, N. / DAUNIZEAU, J.: DEM: A Variational Treatment of Dynamic Systems. *NeuroImage*. Vol. 41. 2008. PP. 849-85
- FRISTON, K. / STEPHAN, K.I.E. / KIEBEL, St.: Free-Energy, Value and Neuronal Systems. In: D. HEINKE / E. MAVRITSAKI (Eds.): *Computational Modelling in Behavioural Neuroscience. Closing the Gap between Neurophysiology and Behaviour*. Psychology Press. Hove. 2009. PP. 266-302
- FRISTON, K. / AO, P.: Free-Energy, Value and Attractors. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. Vol. 2012. PP. 1-27
From: doi:10.1155/2012/937860
- FRITZKE, B.: Wachsende Zellstrukturen – ein selbstorganisierendes neuronales Netzwerkmodell. Dissertation. Technische Fakultät. Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen. 1992
- FUCHS, C.: Towards a Critical Theory of Information. *TripleC – Cognition, Communication, Co-operation*. Vol. 7. 2009. PP. 243-92.
From: <http://www.triple-c.at>
- FUCHS, C. / HOFKIRCHNER, W.: Ein einheitlicher Informationsbegriff für eine einheitliche Informationswissenschaft. In: C. FLOYD / C. FUCHS / W. HOFKIRCHNER (Hrsg.): *Stufen zur Informationsgesellschaft. Festschrift zum 65. Geburtstag von Klaus Fuchs-Kittowski*. Peter Lang. Frankfurt u.a. 2002. S. 242-81
- FUCHS-KITTOWSKI, K.: Information, Organisation, Evolution. In: B. WENZLAFF / K. FUCHS-KITTOWSKI (Hrsg.): *IV. Wissenschaftliches Kolloquium zur Organisation der Informationsverarbeitung*. Berlin 13.12.-15.12.1983. *Information, Organisation und Informationstechnologie*. 1983. S. 76

- FUCHS-KITOWSKI, K. / ROSENTHAL, H.A.: Selbstorganisation, Information und Evolution: Zur Kreativität der belebten Natur. In: N. FENZL / W. HOFKIRCHNER / G. STOCKINGER (Hrsg.): Information und Selbstorganisation: Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information. Studien-Verlag. Innsbruck. 1998. S. 141-88
- FUCHS-KITOWSKI, K. / HEINRICH, L. / ROLF, A.: Information entsteht in Organisationen: in kreativen Unternehmen. Wissenschaftstheoretische und methodologische Konsequenzen für die Wirtschaftsinformatik. In: J. BECKER et al. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik und Wissenschaftstheorie: Bestandsaufnahme und Perspektiven. Betriebswirtschaftlicher Verlag. Wiesbaden. 1999. S. 330-61
- GABBIANI, F.: Rate Coding and Signal Processing. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 941-45
- GÄRDENFORS, P.: A Geometric Model of Concept Formation. In: S. OHSUGA et al. (Eds.): Information Modelling and Knowledge Bases III. IOS Press. Amsterdam. 1992. PP. 1-16
- GÄRDENFORS, P.: How Logic Emerges from the Dynamics of Information. In: J. van EIJCK / A. VISSER (Eds.): Logic and Information Flow. MIT Press. Cambridge/MA. 1994. PP. 49-77
- GÄRDENFORS, P.: Konzeptuelle Räume. Kognitionswissenschaft. Bd. 4. 1995. S. 185-89
- GÄRDENFORS, P.: Mental Representations, Conceptual Spaces and Metaphors. Synthese. Vol. 106. 1996. PP. 21-47
- GÄRDENFORS, P.: Conceptual Spaces as a Basis for Cognitive Semantics. In: A. CLARK / J. EZQUERRO / J. LARRAZABEL (Eds.): Philosophy and Cognitive Science: Categories, Consciousness, and Reasoning. Proceedings of the Second International Colloquium on Cognitive Science. Kluwer. Dordrecht. 1996. PP. 159-80
- GÄRDENFORS, P.: Meanings as Conceptual Structures. In: M. CARRIER / P. MACHAMER (Eds.): Mindscapes: Philosophy, Science, and the Mind. Pittsburgh University Press. Pittsburgh. 1997. PP. 61-86
- GÄRDENFORS, P.: Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations. In: V. CANTONI / V. DI GESU / A. SETTI (Eds.): Human and Machine Perception: Information Fusion. Plenum Press. New York. 1997. PP. 255-70
- GÄRDENFORS, P.: Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. The MIT Press. Cambridge/MA. 2000
- GÄRDENFORS, P.: Concept Combination: A Geometrical Model. In: L. CAVEDON / P. BLACKBURN / N. BRAISBY / A. SHIMOJIMA (Eds.): Logic, Language and Computation. Vol. 3. CSLI. Stanford/CA. 2000. PP. 129-46
- GÄRDENFORS, P.: Concept Learning: A Geometrical Model. Proceedings of the Aristotelian Society. Vol. 101. 2001. PP. 163-83
- GÄRDENFORS, P.: Conceptual Spaces as a Basis for Knowledge Representation. Mind and Matter. Vol. 2. 2004. PP. 9-27

- GÄRDENFORS, P.: Conceptual Spaces. In: R. CHURNSIDE (Ed.): *Espacio y Tiempo en Gestion y Análisis Social*. Chap. 3. Universidad de Costa Rica. 2004
- GÄRDENFORS, P.: *The Dynamics of Thought*. Springer-Verlag. Dordrecht. 2005
- GÄRDENFORS, P.: Reasoning in Conceptual Spaces. In: J. ADLER / L. RIPS: *Reasoning: Studies of Human Inference and its Foundations*. Cambridge University Press. New York. 2008. PP. 302-20
- GÄRDENFORS, P.: Semantics Based on Conceptual Spaces. In: M. BANERJEE / A. SETH (Eds.): *Logic and its Applications*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2011. PP. 1-11
- GÄRDENFORS, P. / WILLIAMS, M.-A.: Reasoning about Categories in Conceptual Spaces. *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence (IJCAI'95)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco/CA. 2001. PP. 385-92
- GARRETT, D.: *Cognition and Commitment in Hume's Philosophy*. Oxford University Press. New York, Oxford. 1997
- GARSON, J.W.: No Representations without Rules: The Prospects for a Compromise between Paradigms in Cognitive Science. *Mind & Language*. Vol. 9. 1994. PP. 25-37
- GARSON, J.: Philosophical Issues about Dynamical Systems. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1033-39
- GARSON, J.: Connectionism. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (July 7, 2010 Edition).
From: <http://plato.stanford.edu/entries/connectionism/>
- GAUKER, C.: A Critique of the Similarity Space Theory of Concepts. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 317-45
- GAUTRAIS, J. / THORPE, S.: Rate Coding versus Temporal Order Coding: A Theoretical Approach. *BioSystems*. Vol. 48. 1998. PP. 57-65
- GAYLER, R.W.: Multiplicative Binding, Representation Operators, and Analogy. [Abstract of Poster]. In: K. HOLYOAK / D. GENTNER / B. KOKINOV: *Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences*. New Bulgarian University. 1998
From: <http://cogprints.org/502/>
- GAYLER, R.: Vector Symbolic Architectures Answer Jackendoff's Challenges for Cognitive Neuroscience. In: P. SLEZAK (Ed.): *Proceedings of the Joint International Conference on Cognitive Science (ICCS/ASCS)*. Sydney/Australia. 13-17 July 2003. University of New South Wales. 2003. PP. 133-38
- GAYLER, R.: Vector Symbolic Architectures are a Viable Alternative for Jackendoff's Challenges. Commentary on: Fr. van der VELDE / M. de KAMPS: *Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 78-79

- GAYLER, R.W. / WALES, R.: Connections, Binding, Unification, and Analogical Promiscuity. In: K. HOLYOAK / D. GENTNER / B. KOKINOV (Eds.): Advances in Analogy Research: Integration of Theory and Data from the Cognitive, Computational, and Neural Sciences. New Bulgarian University. Sofia. 1998. PP. 181-90
From: <http://cogprints.org/500/>
- GAZZANIGA, M.S. / IVRY, R.B. / MANGUN, G.R.: The Cognitive Neurosciences. The Biology of the Mind. 3rd Ed. N.N. Norton. New York. 2009
- GEIER, M.: Der Wiener Kreis. 4. Aufl. Rowohlt. Reinbek bei Hamburg. 2004
- GEMOLL, W. / VRETSKA, K.: Gemoll. Griechisch-deutsches Schul- und Handwörterbuch. 10. Aufl. Oldenbourg Schulbuchverlag GmbH. 2006
- GEORGOPOULOS, A.P. / KALASKA, J. / CAMINITI, R. / MASSEY, J.: On the Relations between the Direction of Two-Dimensional Arm Movements and Gell Discharge in Primate Motor Cortex. The Journal of Neuroscience. Vol. 2. 1982. PP. 1527-37
- GEORGOPOULOS, A.P. / CAMINITI, R. / KALASKA, J. / MASSEY, J.: Spatial Coding of Movement: A Hypothesis Concerning the Coding of Movement Direction by Motor Control Populations. Experimental Brain Research Supplement. Vol. 7. 1983. PP. 327-36
- GEORGOPOULOS, A.P. / SCHWARTZ, A.B. / KETTNER, R.E.: Neuronal Population Coding of Movement Direction. Science. Vol. 233. 1986. PP. 1416-19
- GEORGOPOULOS, A.P. / KETTNER, R.E. / SCHWARTZ, A.B.: Primate Motor Cortex and Free Arm Movements to Visual Targets in Three-Dimensional Space. II. Coding of the Direction of the Movement by a Neuronal Population. The Journal of Neuroscience. Vol. 8. 1988. PP. 2928-37
- GEORGOPOULOS, A.P. / LURITO, J.T. / PETRIDES, M. / SCHWARTZ, A.B. / MASSEY, J.T.: Mental Rotation of the Neuronal Population Vector. Science. Vol. 243. 1989. PP. 234-36
- GERRIG, R.J. / ZIMBARDO, Ph.G.: Psychologie. 18. Aufl. Pearson Studium. 2008
- GERSTEIN, G.L. / BEDENBAUGH, P. / AERTSEN, A.: Neuronal Assemblies. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol. 36. 1989. PP. 4-14
- GERSTNER, W.: Spiking Neurons. In: W. MAASS / Chr.M. BISHOP (Eds.): Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. (1999). 2001. PP. 3-54
- GERSTNER, W. / KISTLER, W.M.: Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press. Cambridge. 2002
- GERTHSEN, Chr.: Gerthsen Physik. 20. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999
- GHAHRAMANI, Z.: Information Theory. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 551-55
- GILMORE, R.: Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. Wiley. New York. 1980
- GINSBURG, H.J. / OPPER, S.: Piaget's Theory of Intellectual Development. 2nd Ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1979
- GLANSDORFF, P. / PRIGOGINE, I.: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. Wiley-Interscience. London. 1971
- GLASER, W.: Repräsentation. In: G. STRUBE (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitions-

- wissenschaft. Klett-Cotta Verlag. Stuttgart. 1996. S. 577-78
- GLASER, W.R.: Informationstheorie. In: J. FUNKE / P.A. FRENCH: Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Kognition. Bd. 5. Hogrefe. Göttingen u.a. 2006. S. 741-47
- GLENNAN, St.: Mechanisms and the Nature of Causation. Erkenntnis. Vol. 44. 1996. PP. 50-71
- GLENNAN, St.: Rethinking Mechanistic Explanation. Philosophy of Science. Vol. 69. 2002. PP. S342-53
- GLENNAN, St.: Mechanisms. In: St. PSILLOS / M. CURD (Eds.): The Routledge Companion to Philosophy of Science. Routledge Taylor & Francis Group. London, New York. 2008. PP. 376-84
- GLOY, K.: Wurzeln und Applikationsbereiche der Systemtheorie. Kritische Fragen. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 5-12
- GLOY, K.: Systemtheorie – das neue Paradigma? In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 227-42
- GÖDEL, K.: Über die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls. Monatshefte für Mathematik und Physik. Bd. 37. 1930. S. 349-60
- GÖDEL, K.: Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. Monatshefte für Mathematik und Physik. Bd. 38. 1931. S. 173-98
- GÖDEL, K.: Zum intuitionistischen Aussagenkalkül. Anzeiger Akademie der Wissenschaften Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Bd. 69. 1932. S. 65-66
- GÖDEL, K. (S. FEFERMAN u.a. (Eds.)): Kurt Gödel. Collected Works. Oxford University Press. New York u.a. 1986-2003
- GOEL, P. / ERMENTROUT, B.: Synchrony, Stability, and Firing Patterns in Pulse-Coupled Oscillators. Physica D. Vol. 163. 2002. PP. 191-216
- GÖRZ, G. et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000
- GÖTSCHL, J.: Selbstorganisation: Neue Grundlagen zu einem einheitlichen Realitätsverständnis. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 35-65
- GOLDSTEIN, L. / SLATER, H.: Wittgenstein, Semantics and Connectionism. Philosophical Investigations. Vol. 21. Issue 4. 1998. PP. 293-314
- GOPNIK, A. / MELTZOFF, A.N.: Words, Thoughts, and Theories. MIT Press. Cambridge/MA. 1997
- GORE, P.A. Jr.: Cluster Analysis. In: H.E.A. TINSLEY / St.D. BROWN: Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. Academic Press. San Diego u.a. 2000. PP. 297-321

- GOSCHKE, Th. / KOPPELBERG, D.: Connectionist Representation, Semantic Compositionality, and the Instability of Concept Structure. *Psychological Research*. Vol. 52. 1990. PP. 253-70 (dt.: Konnektionistische Repräsentation, semantische Kompositionalität und die Kontextabhängigkeit von Konzepten. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): *Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung*. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 65-108)
- GOSCHKE, Th. / KOPPELBERG, D.: Connectionism and the Semantic Content of Internal Representation. *Review of International Philosophy*. Vol. 44. 1990. PP. 87-103
- GOSCHKE, Th. / KOPPELBERG, D.: The Concept of Representation and the Representation of Concepts in Connectionist Models. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): *Philosophy and Connectionist Theory*. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 129-61
- GOTTWALD, S.: *A Treatise on Many-Valued Logics*. Research Studies Press. Baldock. 2001
- GRASSBERGER, P.: Randomness, Information, and Complexity. In: F. RAMOS-GOMES (Ed.): *Proceedings of the Fifth Mexican School on Statistical Physics*. World Scientific. Singapore. 1989
- GRASSBERGER, P.: Problems in Quantifying Self-Generated Complexity. *Helvetica Physica Acta*. Vol. 62. 1989. PP. 489-511
- GRAUEL, A.: *Neuronale Netze. Grundlagen und mathematische Modellierung*. BI Wissenschaftsverlag. Mannheim u.a. 1992
- GRAUPE, D.: *Principles of Artificial Networks*. 2nd Ed. World Scientific. New Jersey. 2008
- GRAY, Ch.M. / SINGER, W.: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in the Cat Visual Cortex. A Cortical Functional Unit. *Society for Neuroscience Abstracts*. Vol. 13. 1987. P. 404.3
- GRAY, Ch.M. / KÖNIG, P. / ENGEL, A.K. / SINGER, W.: Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex Exhibit Inter-Columnar Synchronization which Reflects Global Stimulus Properties. *Nature*. Vol. 338. 1989. PP. 334-37
- GRAY, Ch.M. / SINGER, W.: Stimulus-Specific Neuronal Oscillations in Orientation Columns of Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 86. 1989. PP. 1698-1702
- GRAY, Ch.M. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Mechanisms Underlying the Generation of Neuronal Oscillations in Cat Visual Cortex. In: E. BAŞAR / T.H. BULLOCK (Eds.): *Induced Rhythms in the Brain*. Birkhäuser. Boston, Basel, Berlin. 1992. PP. 29-45
- GRAY, R.M.: *Entropy and Information Theory*. Springer-Verlag. New York. 2009
- GREEN, D.W. et al.: *Cognitive Science. An Introduction*. Blackwell. Oxford. 1996
- GREWENDORF, G. / HAMM, Fr. / STERNEFELD, W.: *Sprachliches Wissen. Eine Einführung in moderne Theorien der grammatischen Beschreibung*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1993
- GROSS, C.G. / ROCHA-MIRANDA, C.E. / BENDER, D.B.: Visual Properties of Neurons in Inferotemporal Cortex of the Macaque. *Journal of Neurophysiology*. Vol. 35. 1972. PP. 96-111

- GROSS, Ch.G.: Genealogy of the "Grandmother Cell". *The Neuroscientist*. Vol. 8. 2002. PP. 512-18
- GROSSBERG, St.: A Prediction Theory for some Nonlinear Functional-Differential Equations, I: Learning of Lists. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. Vol. 21. 1968. PP. 643-94
- GROSSBERG, St.: A Prediction Theory for some Nonlinear Functional-Differential Equations, II: Learning of Patterns. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. Vol. 22. 1968. PP. 490-522
- GROSSBERG, St.: Neural Pattern Discrimination. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 27. 1970. PP. 291-337 (reprinted in: G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG (Eds.): *Pattern Recognition by Self-Organizing Neural Networks*. MIT Press. Cambridge. 1993)
- GROSSBERG, St.: Neural Expectation: Cerebellar and Retinal Analogs of Cells Fired by Learnable or Unlearned Patterns Classes. *Kybernetik*. Vol. 10. 1972. PP. 49-57 (reprinted in: G.A. CARPENTER / St. GROSSBERG (Eds.): *Pattern Recognition by Self-Organizing Neural Networks*. MIT Press. Cambridge. 1993)
- GROSSBERG, St.: On the Development of Feature Detectors in the Visual Cortex with Applications to Learning and Reaction-Diffusion Systems. *Biological Cybernetics*. Vol. 21. 1976. PP. 145-59
- GROSSBERG, St.: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: I. Parallel Development and Coding of Neural Feature Detectors. *Biological Cybernetics*. Vol. 23. 1976. PP. 121-34 (reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): *Neurocomputing*. Vol. 1. Foundation of Research. Chap. 19. MIT Press. Cambridge/MA. 1989. PP. 245-58)
- GROSSBERG, St.: Adaptive Pattern Classification and Universal Recoding: II. Feedback, Expectation, Olfaction, and Illusions. *Biological Cybernetics*. Vol. 23. 1976. PP. 187-202
- GROSSBERG, St.: How does a Brain Build a Cognitive Code? *Psychological Review*. Vol. 87. 1980. PP. 1-51
- GROSSBERG, St.: *Neural Networks and Natural Intelligence*. 5th Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 1992
- GROSSBERG, St.: Principles of Cortical Synchronization. Commentary on: W.A. PHILLIPS / W. SINGER: In Search of Common Foundations for Cortical Computation. *The Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 689-90
- GROSSBERG, St. / SOMERS, D.: Synchronized Oscillations During Cooperative Feature Linking in a Cortical Model of Visual Perception. *Neural Networks*. Vol. 4. 1991. PP. 453-66
- GROSSBERG, St. / VERSACE, M.: Spikes, Synchrony, and Attentive Learning by Laminar Thalamocortical Circuits. *Brain Research*. Vol. 1218. 2008. PP. 278-312
- GRUSH, R.: The Emulation Theory of Representation: Motor Control, Imagery, and Perception. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 27. 2004. PP. 377-442
- GUARINI, M.: A Defense of Connectionism against the „Syntactic“ Argument. *Synthese*. Vol. 128. 2001. PP. 287-317

- GUCKENHEIMER, J. / HOLMES, Ph.: Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Rev. and Corr. 3rd Printing. Springer-Verlag. New York. 1990
- GUESGEN, H.W.: Constraints. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 267-87
- GUESGEN, H.W. / HERTZBERG, J.: A Perspective of Constraint-Based Reasoning. An Introductory Tutorial. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1992
- GUTFREUND, H.: From Statistical Mechanics to Neural Networks and Back. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 163. 1990. PP. 373-85
- HADLEY, R.F.: Compositionality and Systematicity in Connectionist Language Learning. In: Proceedings of the 14th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1992. PP. 659-61
- HADLEY, R.F.: Systematicity in Connectionist Language Learning. *Mind and Language*. Vol. 9. 1994. PP. 247-72
- HADLEY, R.F.: Systematicity Revisited: Reply to Christiansen and Chater and Niklasson and van Gelder. *Mind and Language*. Vol. 9. 1994. PP. 431-44
- HADLEY, R.F.: Cognition, Systematicity and Nomic Necessity. *Mind and Language*. Vol. 12. 1997. PP. 137-53
- HADLEY, R.F.: Systematicity of Generalizations in Connectionist Networks. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1151-56
- HADLEY, R.F.: On the Proper Treatment of Semantic Systematicity. *Minds and Machines*. Vol. 14. 2004. PP. 145-72
- HADLEY, R.F.: Neural Circuits, Matrices, and Conjunctive Binding. Commentary on: Fr. van der Velde / M. de Kamps: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. P. 80
- HADLEY, R.F.: Synchronous vs. Conjunctive Binding: A False Dichotomy? *Connection Science*. Vol. 19. 2007. PP. 1423-27
- HADLEY, R.F. / HAYWARD, M.B.: Strong Semantic Systematicity from Unsupervised Connectionist Learning. In: Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Pittsburgh, Pennsylvania. July, 1995. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1995. PP. 358-63
- HADLEY, R.F. / HAYWARD, M.B.: Strong Semantic Systematicity from Hebbian Connectionist Learning. *Minds and Machines*. Vol. 7. 1997. PP. 1-37
- HADLEY, R.F. / ARNOLD, D. / CARDEI, VI.: Syntactic Systematicity Arising from Semantic Predictions in a Hebbian-Competitive Network. In: Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Madison, Wisconsin. August, 1998. Erlbaum. Mahwah/NJ. 1998. PP. 460-65
- HADLEY, R.F. / CARDEI, VI.: Language Acquisition from Sparse Input without Error Feedback. *Neural Networks*. Vol. 12. 1999. PP. 217-35
- HADLEY, R.F. / ROTARU-VARGA, A. / ARNOLD, D. / CARDEI, VI.: Syntactic Systematicity Arising from Semantic Predictions in a Hebbian-Competitive Network. *Connection Science*. Vol. 13. 2001. PP. 73-94

- HÄNDLE, Fr. / JENSEN, St.: Einleitung der Herausgeber. In: Fr. HÄNDLE / St. JENSEN (Hrsg.): Systemtheorie und Systemtechnik. Nymphenburger Verlags- handlung. München. 1974. S. 7-50
- HÄUSLEIN, A.: Systemanalyse. Grundlagen, Techniken, Notierungen. VDE-Ver- lag. Berlin, Offenbach. 2003
- HAIR, J.F. / BLACK, W. / BABIN, B. / ANDERSON, R. / TATHAM, R.: Multivariate Data Analysis. A Global Perspective. 7th Ed. Pearson. Upper Saddle River/NJ. 2010
- HAKEN, H. (Ed.): Synergetics. Cooperative Phenomena in Multikomponent Systems. Proceedings of the Symposium on Synergetics from April 30 to May 6, 1972, Schloß Elmau. Teubner. Stuttgart. 1973
- HAKEN, H.: Entwicklungslinien der Synergetik I. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 163-72
- HAKEN, H.: Entwicklungslinien der Synergetik II. Naturwissenschaften. Bd. 75. 1988. S. 225-34
- HAKEN, H.: Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. 1st Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1988
- HAKEN, H.: Synergetik. Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenüber- gänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie. 3. Aufl. Sprin- ger-Verlag . Berlin u.a. 1990 (engl.: Synergetics. Introduction and Advanced Topics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004)
- HAKEN, H.: Synergetics as a Tool for the Conceptualization and Mathematiza- tion of Cognition and Behaviour – How Far Can we Go? In: H. HAKEN / M. STADLER (Eds.): Synergetics of Cognition. Proceedings of the International Symposium at Schloß Elmau, Bavaria, June 4-8, 1989. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990. PP. 2-31
- HAKEN, H.: Erfolgsgeheimnisse der Natur: Synergetik: Die Lehre vom Zusam- menwirken. 2. Aufl. Ullstein Sachbuch. Frankfurt/Main, Berlin. 1991
- HAKEN, H.: Synergetic Computers and Cognition: A Top-Down Approach to Neural Nets. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1991
- HAKEN, H.: Principles of Brain Functioning. A Synergetic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognition. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 1996
- HAKEN, H.: Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. 2nd Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2000
- HAKEN, H.: Brain Dynamics. An Introduction to Models and Simulations. 2nd Ed. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. (2002) 2008
- HAKEN, H.: Selbstorganisation in physikalischen Systemen. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 163-80
- HAKEN, H. / GRAHAM, R.: Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken. Was verbindet die Physik, Chemie und Biologie? Umschau in Wissenschaft und Technik. Bd. 6. 1971. S. 191-95
- HAKEN, H. / STADLER, M. (Eds.): Synergetics of Cognition. Proceedings of the International Symposium at Schloß Elmau, Bavaria, June 4-8, 1989. Springer- Verlag. Berlin u.a. 1990

- HAKEN, H. / MIKHAILOV, A. (Eds.): *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993
- HAKEN, H. / TSCHACHER, W.: *Intentionality in Non-Equilibrium Systems? The Functional Aspects of Self-Organized Pattern Formation*. *New Ideas in Psychology*. Vol. 25. 2007. PP. 1-15
- HAKEN, H. / SCHIEPEK, G.: *Synergetik in der Psychologie. Selbstorganisation verstehen und gestalten*. 2. Aufl. Hogrefe Verlag. Göttingen u.a. 2010
- HAKEN, H. / TSCHACHER, W.: *A Theoretical Model of Intentionality with an Application to Neural Dynamics*. *Mind and Matter*. Vol. 8. 2010. PP. 7-18
- HAKEN, H. / TSCHACHER, W.: *The Transfer of Principles of Non-Equilibrium Physics to Embodied Cognition*. In: W. TSCHACHER / C. BERGOMI (Eds.): *The Implications of Embodiment: Cognition and Communication*. Imprint Academic. Exeter. 2011. PP. 75-88
- HALL, A.D. / FAGEN, R.E.: *Definition of System*. In: W. BUCKLEY (Ed.): *Modern System Research for the Behavioral Scientist*. Aldine Publishing Company. Chicago. 1968. PP. 81-92
- HALLER, R.: *Neopositivismus. Eine historische Einführung in die Philosophie des Wiener Kreises*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt 1993
- HAMMER, B.: *Compositionality in Neural Systems*. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 244-48
- HAMMER, B. / VILLMANN, T.: *Mathematical Aspects of Neural Networks*. In: *Proceedings of the European Symposium on Artificial Networks (ESANN'2003)*. Bruges, Belgium, 23.-25. April 2003. 2003. PP. 59-72
- HAMPTON, J.A.: *Concepts*. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999 PP. 176-79
- HAMPTON, J. / JÖNSSON, M.: *Typicality and Compositionality: The Logic of Combining Vague Concepts*. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 385-402
- HARDCASTLE, V.G.: *The Binding Problem*. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): *A Companion to Cognitive Science*. Blackwell Publisher. Malden/MA, Oxford/UK. 1998. PP. 555-65
- HARDCASTLE, V.G.: *On Being Importantly Necessary for Consciousness*. *Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 152-54
- HARNAD, St.: *The Symbol Grounding Problem*. *Physica*. D42. 1990. PP. 335-46
- HARTLEY, R.V.L.: *Transmission of Information*. *Bell System Technical Journal*. Vol. 7. 1928. PP. 535-63
- HATFIELD, G.: *Representation and Rule-Instantiation in Connectionist Systems*. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. 1991. PP. 90-112 (dt.: *Repräsentation und Regeln in konnektionistischen Systemen*. In: H. HILDEBRANDT / E. SCHEERER (Hrsg.): *Interdisziplinäre Perspektiven der Kognitionsforschung*. Peter Lang. Frankfurt/M. u.a. 1993. S. 133-55)

- HAUGELAND, J.: Artificial Intelligence: The Very Idea. 7. Aufl. The MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1985
- HAYKIN, S.: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River/NJ. 1999
- HEBB, D.O.: The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. Wiley-Interscience. New York. 1949
- HEIDELBERGER, M.: Selbstorganisation im 19. Jahrhundert. In: W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg): Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution. Vieweg. Braunschweig und Wiesbaden. 1990. S. 67-104
- HEINE, J.: Topologie und Funktionalanalysis. Oldenbourg. München, Wien. 2009
- HELM, G.: Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1991
- HENDERSON, J.: Connectionist Syntactic Parsing Using Temporal Variable Binding. Journal of Psycholinguistic Research. Vol. 23. 1994. PP. 353-79
- HENDRIKS, P.: Compositionality and Model-Theoretic Interpretation. Journal of Logic, Language and Information. Vol. 10. 2001. PP. 29-48
- HERRMANN, Chr.S. / MUNK, M.H.J. / ENGEL, A.K.: Cognitive Functions of Gamma-Band Activity: Memory Match and Utilization. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 8. 2004. PP. 347-55
- HERRMANN, Th.: Mentale Repräsentation – ein erläuterungsbedürftiger Begriff. In: J. ENGELKAMP / T. PECHMANN (Hrsg.): Mentale Repräsentation. Huber Verl. Bern. 1993. S. 17-30
- HERZOG, M.H. / ESFELD, M. / GERSTNER, W.: Consciousness & the Small Network Argument. Neural Networks. Vol. 20. 2007. PP. 1054-56
- HEUDIN, J.-Cl.: Artificial Life and the Sciences of Complexity: History and Future. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 227-47
- HEYLIGHEN, Fr.: The Science of Self-Organization and Adaptivity. In: L.D. KIEL (Ed.): The Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers. Oxford. 2003
- HINRICHSEN, D.: Introduction to Mathematical Systems Theory. Lecture Notes for a Joint Course at the Universities of Warwick and Bremen. Zentraldruckerei der Universität Bremen. Bremen. 1981, 1988
- HINRICHSEN, D. / PRITCHARD, A.J. (Eds.): Mathematical Systems Theory I. Modeling, State Space Analysis, Stability and Robustness. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2010
- HINTON, G.E.: Connectionist Learning Procedures. Artificial Intelligence. Vol. 40. 1989. PP. 185-234
- HINTON, G.E. / SEJNOWSKI, T.J.: Learning and Relearning in Boltzmann Machines. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 282-317

- HINTON, G.E. / McCLELLAND, J.L.: Learning Representations by Recirculation. In: D.Z. ANDERSON (Ed.): Neural Information Processing Systems. American Institute of Physics. New York. 1988. PP. 358-66
- HIRSCH, M.W. / SMALE, St.: Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra. Academic Press. New York u.a. 1974
- HIRSCHBERGER, J.: Geschichte der Philosophie. Band II: Neuzeit und Gegenwart. 13. Aufl. Herder. Freiburg u.a. 1991
- HIRSTEIN, W.: On the Churchlands. Thomson Wadsworth. Toronto. 2004
- HJØRLAND, B.: Concept Theory. Journal of the American Society for Information Science and Technology. Vol. 60. 2009. PP. 1519-36
- HOBBS, Th. (J.C.A. GASKIN (Ed.)): Leviathan. Oxford University Press. Oxford. (1651) 1998
- HODGES, W.: Formal Features of Compositionality. Journal of Logic, Language and Information. Vol. 10. 2001. PP. 7-28
- HÖFFE, O.: Immanuel Kant. 7. Auflage. Beck, München 2007
- HÖFFE, O.: Kants Kritik der reinen Vernunft. Die Grundlegung der modernen Philosophie. Beck. München. 2011
- HÖLDOBLER, St.: Computational Logic. Working Material. Artificial Intelligence Institute. Technische Universität Dresden. 2004
- HÖLSCHER, Chr.: How could Populations of Neurons Encode Information. In: Chr. HÖLSCHER / M. MUNK (Eds.): Information Processing by Neuronal Populations. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 2009. PP. 3-17
- HOFER, V.: Organismus und Ordnung. Zu Genesis und Kritik der Systemtheorie Ludwig von Bertalanffys. Dissertation. Geisteswissenschaftliche Fakultät. Universität Wien. 1996
- HOFER, V.: Der Beginn der biologischen Systemtheorie im Kontext der Wiener Moderne. Diskurslinien und Wissenschaftsgemeinschaften als intellektueller Hintergrund für Ludwig von Bertalanffy. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 137-58
- HOFKIRCHNER, W.: Information und Selbstorganisation – zwei Seiten einer Medaille. In: N. FENZL / W. HOFKIRCHNER / G. STOCKINGER (Hrsg.): Information und Selbstorganisation: Annäherung an eine vereinheitlichte Theorie der Information. Studien-Verlag. Innsbruck. 1998. S. 69-99
From: http://igw.tuwien.ac.at/igw/Menschen/hofkirchner/papers/InfoConcept/Information_Selbstorganisation/1998nc.html#note9
- HOFKIRCHNER, W. (Ed.): The Quest for a Unified Theory of Information. Overseas Publ. Amsterdam. 1999
- HOFKIRCHNER, W.: How to Achieve a Unified Theory of Information. TripleC – Cognition, Communication, Co-operation. Vol. 7. 2009. PP. 357-68
From: <http://www.triple-c.at>
- HOFKIRCHNER, W. / FLEISSNER, P. (Eds.): Special Issue Based on the Second Conference on Foundations of Information Science. Vienna, Austria, June 11.-15., 1996. The Quest of a Unified Theory of Information. Biosystems. Vol. 46/48. 1998

- HOFKIRCHNER, W. / SCHAFRANEK, M.: General Systems Theory. In: Cl. HOOKER (Ed.): Philosophy of Complex Systems. Handbook of the Philosophy of Science. Vol. 10. Elsevier. New York. 2011. PP. 177-94
- HOFSTADTER, D.R.: Metamagical Themas: Questing for the Essence of Mind and Pattern. Basic Books. New York. 1985
- HOLTHAUSEN, Kl.: Neuronale Netzwerke und Informationstheorie. Dissertation. Münster. 1995
- HOLTHAUSEN, Kl. / BREIDBACH, O.: Information Theory and Topology: New Learning Mechanisms. In: N. ELSNER / H.-U. SCHNITZLER (Eds.): Brain and Evolution. Proceedings of the 24th Göttingen Neurobiology Conference. G. Thieme Verlag. 1996
- HOLTHAUSEN, Kl. / BREIDBACH, O.: Self-Organized Feature Maps and Information Theory. Network: Computation in Neural Systems. Vol. 8. 1997. PP. 215-27
- HOLTHAUSEN, Kl. / BREIDBACH, O.: Analytical Description of the Evolution of Neural Networks: Learning Rules and Complexity. Biological Cybernetics. Vol. 81. 1999. PP. 169-75
- HOLYOAK, K.J. / THAGARD, P.: Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 13. 1989. PP. 295-355
- HOPFIELD, J.J.: Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Properties. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 79. 1982. PP. 2554-58 (reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): Neurocomputing: Foundations of Research. Chap. 27. MIT Press. Cambridge/MA. 1988. PP. 460-64)
- HOPFIELD, J.J.: Pattern Recognition Computation Using Action Potential Timing for Stimulus Representation. Nature. Vol. 376. 1995. PP. 33-36
- HORGAN, T. / TIENSON, J. (Eds.): Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. 1988
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Representation without Rules. Philosophical Topics. Vol. 17. 1989. PP. 147-74
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Soft Laws. In: P.A. FRENCH / Th.E. UEHLING, Jr. / H.K. WETTSTEIN: Midwest Studies in Philosophy. Volume XV. The Philosophy of the Human Sciences. Univ. of Notre Dame Press. Notre Dame/Indiana. 1990. PP. 256-79
- HORGAN, T. / TIENSON, J. (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Settling into a New Paradigm. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 241-60
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Structured Representations in Connectionist Systems? In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 195-228
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Cognitive Systems as Dynamical Systems. Topoi. Vol. 11. 1992. PP. 27-43

- HORGAN, T. / TIENSON, J.: A Nonclassical Framework for Cognitive Science. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 305-45
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Representations don't Need Rules: Reply to James Garson. Mind & Language. Vol. 9. 1994. PP. 38-55
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Connectionism and the Philosophy of Psychology. The MIT Press. Cambridge/MA. 1996
- HORGAN, T. / TIENSON, J.: Rules and Representations. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 724-26
- HORST, St.: Computational Theory of Mind. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 170-72
- HOUDÉ, O. et al. (Eds.): Dictionary of Cognitive Science. Neuroscience, Psychology, Artificial Intelligence, Linguistic, and Philosophy. Psychology Press. New York, Hove. 2004
- HOUNG, A.Y.: Philosophical Issues about Levels of Analysis. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 852-55
- HOYNINGEN-HUENE, P. : Formale Logik. Eine philosophische Einführung. Philipp Reclam jun. Stuttgart. 1998
- HUBEL, D.H. / WIESEL, T.N.: Receptive Fields of Single Neurones in the Cat's Striate Cortex. Journal of Physiology. Vol. 148. 1959. PP. 574-91
- HUBEL, D.H. / WIESEL, T.N.: Receptive Fields and Functional Architecture in two Nonstriate Visual Areas (18 and 19) of the Cat. Journal of Neurophysiology. Vol. 28. 1965. PP. 229-89
- HUBER, L.: Wie das Neue in die Gehirne kommt. Emergenz und Chaos in neuronalen Prozessen. In: L. HUBER (Hrsg.): Wie das Neue in die Welt kommt. Phasenübergänge in Natur und Kultur. WUV. Wien. 2000. S. 157-74
- HÜLSMANN, M. / WYCISK, Chr. / AGARWAL, R. / GRAPP, J.: Prologue to Autonomous Cooperation – the Idea of Self-Organization as its Basic Concepts. In: M. HÜLSMANN / K. WINDT: Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2007. PP. 23-44
- HUETT, M.-Th. / MARR, C.: Selbstorganisation als Metatheorie. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 106-26
- HUME, D. (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): An Enquiry Concerning Human Understanding. In: Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals. 3rd Ed. Oxford University Press. Oxford. (1748, 1777) 1975
- HUME, D. (ed. by T.L. BEAUCHAMP): An Enquiry Concerning Human Understanding. Oxford University Press. Oxford. (1748) 1999
- HUME, D. (dt. übers. von R. RICHTER): Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand. Suhrkamp. Frankfurt am Main. (1748) 2007
- HUME, D. (L.A. SELBY-BIGGE / P.H. NIDDITCH (Eds.)): A Treatise of Human Nature. 2nd Ed. Clarendon Press. Oxford. (1749/50) 1978

- HUME, D. (D.F. NORTON / M.J. NORTON (Eds.)): *A Treatise of Human Nature*. Oxford University Press. Oxford. (1749/50) (2000) 2009
- HUME, D. (compiled and edited by M.C. ROOKS): *The Complete Works and Correspondence of David Hume*. InteLex Corporation: Charlottesville. 1995
- HUMMEL, J.: Binding Problem. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 85-86
- HUMMEL, J.E.: Complementary Solutions to the Binding Problem in Vision: Implications for Shape Perception and Object Recognition. *Visual Cognition*. Vol. 8. 2001. PP. 489-517
- HUMMEL, J.E. / BIEDERMAN, I.: Dynamic Binding: A Basis for the Representation of Shape by Neural Networks. In: *Program of the Twelfth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Vol. 2. Hillsdale, NJ. 1990. PP. 614-21
- HUMMEL, J.E. / BIEDERMAN, I.: Dynamic Binding in a Neural Network for Shape Recognition. *Psychological Review*. Vol. 99. 1992. PP. 480-517
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J.: Indirect Analogical Mapping. In: *Proceedings of the Fourteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 516-21
- HUMMEL, J.E. / BURNS, B. / HOLYOAK, K.J.: Analogical Mapping by Dynamic Binding: Preliminary Investigations. In: K.J. HOLYOAK / J.A. BARNDEN (Eds.): *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory*. Vol. 2. Analogical Connections. Ablex Publishing. Norwood/NJ. 1994. PP. 416-45
- HUMMEL, J.E. / MELZ, E.R. / THOMPSON, J. / HOLYOAK, K.J.: Mapping Hierarchical Structures with Synchrony for Binding: Preliminary Investigations. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 433-38
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J.: Distributed Representation of Structure: A Theory of Analogical Access and Mapping. *Psychological Review*. Vol. 104. 1997. PP. 427-66
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J.: A Symbolic-Connectionist Theory of Relational Inference and Generalization. *Psychological Review*. Vol. 110. 2003. PP. 220-64
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J.: Relational Reasoning in a Neurally-Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society*. Vol. 10. 2003. PP. 58-75
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J. / GREEN, C. / DOUMAS, L.A.A. / DEVNICH, D. / KITTUR, A. / KALAR, D.J.: A Solution to the Binding Problem for Compositional Connectionism. In: S.D. LEVY / R. GAYLER (Eds.): *Compositional Connectionism in Cognitive Science*. Papers from the AAI Fall Symposium. AAI Press. Menlo Park/CA. 2004. PP. 31-34
- HUMMEL, J.E. / HOLYOAK, K.J.: Relational Reasoning in a Neurally Plausible Cognitive Architecture: An Overview of the LISA Project. *Current Directions in Cognitive Science*. Vol. 14. 2005. PP. 153-57

- HUPPERT, B. / WILLEMS, W.: Lineare Algebra. Mit zahlreichen Anwendungen in Kryptographie, Codierungstheorie, Mathematischer Physik und Stochastischen Prozessen. 2. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2010
- HUSSERL, Ed.: Logische Untersuchungen. Meiner. Hamburg. (1900/1901) 2009
- HUXLEY, J.: Evolution – the Modern Synthesis. MIT Press. Cambridge/MA. (1942) 2010
- IKEGAYA, Y. / AARON, G. / COSSART, R. / ARONOV, D. / LAMPL, I. / FERSTER, D. / YUSTE, R.: Synfire Chains and Cortical Songs: Temporal Modules of Cortical Activity. Science. Vol. 304. 2004. PP. 559–64
- IMBODEN, D.M. / KOCH, S.: Systemanalyse. Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme. 1. Aufl. 3. korrigierter Nachdruck. Springer. Berlin u.a.. 2008
- ISHIZUKA, S. / HAYASHI, H.: Chaotic and Phase-Locked Responses of the Somatosensory Cortex to a Periodic Medial Lemniscus Stimulation in the Anesthetized Rat. Brain Research. Vol. 723. 1996. PP. 46-60
- JACKENDOFF, R.: Semantics and Cognition. MIT Press. Cambridge/MA. 1983
- JACKENDOFF, R.: What Is a Concept, that a Person May Grasp it? Mind and Language. Vol. 4. 1989. PP. 68-102
- JACKENDOFF, R.: Foundations of Language. Brain, Meaning, Grammar, Evolution. Oxford University Press. Oxford. 2002
- JAEGER, H.: Dynamische Systeme in der KI und ihren Nachbarwissenschaften. Arbeitspapiere der GMD 925. St. Augustin. 1995. S. 1-37
- JAEGER, H.: Dynamische Systeme in der Kognitionswissenschaft. Kognitionswissenschaft. Bd. 5. 1996. S. 151-74
- JÄNICH, Kl.: Lineare Algebra. 9. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002
- JANICH, P.: Was ist Information. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 2006
- JANSSEN, Th.: Foundations and Applications of Montague Grammar. Part 1: Philosophy, Framework, Computer Science. Centrum voor Wiskunde en Informatica. Amsterdam. 1986
- JANSSEN, Th.M.V.: Compositionality. In: J. van BENTHEM / A. ter MEULEN (Eds.): Handbook of Logic and Language. Elsevier. Amsterdam. 1997. PP. 417-73
- JANTSCH, E. : Die Selbstorganisation des Universums. Vom Urknall zum menschlichen Geist. Carl Hanser Verlag. München, Wien (1979) 1992
- JANTSCH, E.: System, Systemtheorie. In: H. SEIFFERT / G. RADNITZKY: Handlexikon zur Wissenschaftstheorie. Ehrenwirth Verlag. München. 1989. S. 332
- JENSEN, St.: Systemtheorie. Verlag. W. Kohlhammer. Stuttgart u.a. 1983
- JOHNSON, J.S. / SPENCER, J.P. / SCHÖNER, Gr.: A Layered Neural Architecture for the Consolidation, Maintenance, and Updating of Representations in Visual Working Memory. Brain Research. Vol. 1299. 2009. PP. 17-32
- JONES, G. / RITTER, Fr.E.: Production Systems and Rule-Based Inference. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 741-47
- JOST, J.: Mathematische Ansätze in der Kognitionsforschung. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 180-94

- JOST, J. / HOLTHAUSEN, KI. / BREIDBACH, O.: On the Mathematical Foundations of a Theory of Neural Representation. *Theory in Biosciences*. Vol. 116. 1997. PP. 125-39
- JOYCE, D.W. / RICHARDS, L.V. / CANGELOSI, A. / COVERNTY, K.R.: On the Foundations of Perceptual Symbol Systems: Specifying Embodied Representations via Connectionism. *Proceedings of the 5th International Conference on Cognitive Modeling: The Logic of Cognitive Systems (ICCM)*. Bamberg, Germany. April, 9-12, 2003. Universitäts-Verlag. 2003. PP. 147-53
- JUARRERO, A.: *Complex Dynamical Systems Theory*. Manuscript
From: http://cognitive-edge.com/uploads/articles/100608%20Complex_Dynamical_Systems_Theory.pdf
- JUNKER, Th.: *Die zweite Darwinsche Revolution. Geschichte des Synthetischen Darwinismus in Deutschland 1924 bis 1950*. Basilisken-Press. Marburg 2004
- KALLENRODE, M.-B.: *Rechenmethoden der Physik. Mathematischer Begleiter zur Experimentalphysik*. 2. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2005
- KANDEL, E.R. / SCHWARTZ, J.H. / JESSELL, Th.M. (Eds.): *Principles of Neural Science*. 5th Ed. McGraw-Hill. New York u.a. 2008 (dt.: *Neurowissenschaften. Eine Einführung*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin, Oxford. 1996)
- KANERVA, P.: *Sparse Distributed Memory*. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. 1990
- KANERVA, P.: *Sparse Distributed Memory and Related Models*. In: M.H. HAS-SOUN (Ed.): *Associative Neural Memories: Theory and Implementation*. Oxford University Press. New York. 1993. PP. 50-76
- KANERVA, P.: *The Spatter Code for Encoding Concepts at Many Levels*. In: M. MARINARO / P.G. MORASSO (Eds.): *Proceedings of International Conference on Artificial Neural Networks 1994 (ICANN.94)*. Springer-Verlag. London/UK. 1994. PP. 226-29
From: <http://citeseer.ist.psu.edu/666731.html>
- KANERVA, P.: *Binary Spatter-Coding of Ordered k-Tuples*. In: Chr. von der MALSBURG / W. von SEELEN / J. VORBRUGGEN / B. SENDHOFF (Eds.): *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN96)*. Bochum, Germany. July 16-19, 1996. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1996. PP. 869-73
- KANERVA, P.: *Fully Distributed Representation*. *Proceedings of the 1997 Real World Computing Symposium (RWC'97, Tokyo)*. Report TR-96001. Real World Computing Partnership. Tsukuba-City/Japan. 1997. PP. 358-65
- KANERVA, P.: *Hyperdimensional Computing: An Introduction to Computing in Distributed Representation with High-Dimensional Random Vectors*. *Cognitive Computation*. Vol. 1. 2009. PP. 139-59
- KANITSCHIEDER, B.: *Chaos und Selbstorganisation in Natur- und Geisteswissenschaft*. In: M.-Th. HUETT / A.M. FREUND (Hrsg.): *Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft*. Böhlau. Köln u.a. 2006. S. 66-90
- KANT, I.: *Gesammelte Schriften*. Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Reimer/De Gruyter. Berlin u.a. (1747-1803) 1902-2009

- KANT, I. (W. WEISCHEDEL (Hrsg.)): Kritik der reinen Vernunft 1. Werkausgabe Bd. 3. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1781) 1990
- KANT, I. (W. WEISCHEDEL (Hrsg.)): Kritik der reinen Vernunft 2. Werkausgabe Bd. 4. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1781) 1990
- KAPLAN, D.M. / BECHTEL, W.: Dynamical Models: An Alternative or Complement to Mechanistic Explanations. Topics in Cognitive Science. Vol. 3. 2011. PP. 438-44
- KASABOV, N.: Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2nd Ed. 1998
- KATOK, A. / HASSELBLATT, B.: Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems. Cambridge University Press. Cambridge. 1995
- KATZ, J.J.: Philosophy of Language. Harper & Row. New York. 1966
- KATZ, J.J.: Semantic Theory. Harper and Row. New York. 1972
- KATZ, J.J. / FODOR, J.A.: The Structure of a Semantic Theory. Language. Vol. 39. 1963. PP. 170-210
- KATZ, J.J. / POSTAL, P.: An Integrated Theory of Linguistic Descriptions. MIT Press. Cambridge/MA. (1964) 1965
- KAUFFMAN, St.: Emergent Properties in Random Complex Systems. Physica. D. 10 D. 1984. PP. 146-56
- KAUFFMAN, St.: Anti-Chaos and Adaptation. Scientific American. Vol. 265. 1991. PP. 78-84
- KAUFFMAN, St.: The Origins of Order: Self-Organizing and Selection in Evolution. Oxford University Press. New York. 1993
- KAUFFMAN, St.: At Home in the Universe. The Search of the Laws of Self-Organization and Complexity. Oxford University Press. New York u.a. 1995
- KAUFFMAN, St.: Investigations. Oxford University Press. Oxford. 2000
- KAUFFMAN, St.: Reinventing the Sacred: A New View of Science, Reason, and Religion. Basic Books. New York. 2008
- KAUFFMAN, St. / LEVIN, S.: Towards a General Theory of Adaptive Walks on Rugged Landscapes. Journal of Theoretical Biology. Vol. 128. 1987. PP. 11-45
- KAUFFMAN, St. / LOGAN, R.K. / ESTE, R. / GOEBEL, R. / HOBILL, D. / SHMULEVICH, I.: Propagating Organization: An Enquiry. Biology & Philosophy. 2007. PP. 1-19
- KAUFMANN, H. / PAPE, H.: Clusteranalyse. In: L. FAHRMEIR / A. HAMERLE / G. TUTZ (Hrsg.): Multivariate statistische Verfahren. 2. Aufl. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1996
- KAVOURAS, M. / KOKLA, M.: Theories of Geographic Concepts: Ontological Approaches to Semantic Integration. CRC Press. Boca Raton/FL. 2007. PP. 85-91
- KAYSER, Chr. / SALAZAR, R.F. / KÖNIG, P.: Responses to Natural Scenes in Cat V1. Journal of Neurophysiology. Vol. 90. 2003. PP. 1910-20
- KEIL, Fr.C.: Concepts, Kinds and Cognitive Development. MIT Press. Cambridge/MA. 1989

- KELLER, J.: Konnektionismus – ein neues Paradigma zur Wissensrepräsentation? Linguistische Berichte. Bd. 128. 1990. S. 298-331
- KEMKE, Chr.: Der Neuere Konnektionismus. Informatik Spektrum. Bd. 11. 1988. S. 143-62
- KENNEDY, J. / EBERHART, R.C.: Particle Swarm Optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Vol. IV. IEEE Service Center. Piscataway/NJ. 1995. PP. 1942-48
- KERKHOFF, G. / HELDMANN, B.: BÁLINT-Syndrom und assoziierte Störungen. Nervenarzt. Bd. 70. 1999. S. 859-69
- KESSELRING: Jean Piaget. Verlag C.H. Beck. München 1988
- KEUTH, H.: Die Philosophie Karl Poppers. 2. Aufl. Mohr Siebeck. Tübingen. 2011
- KHALIL, H.K.: Nonlinear Systems. Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2002
- KIRSH, D.: When is Information Explicitly Represented? In: P. HANSON (Ed.): Information, Language and Cognition. UBC Press. Vancouver/BC. 1991. PP. 340-65
- KISS, G.: Grundzüge und Entwicklung der Luhmannschen Systemtheorie. 2. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1990
- KLIR, G.J.: An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969
- KLIR, G.J.: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991
- KNEER, G. / NASSEHI, A.: Niklas Luhmanns Theorie sozialer Systeme. Wilhelm Fink Verlag. München. 1993
- KNIELING, S.: Einführung in die Modellierung künstlich neuronaler Netzwerke. WiKu-Verlag für Wissenschaft und Kultur. 2007
- KNILL, D.C. / POUGET, A.: The Bayesian Brain: The Role of Uncertainty in Neural Coding and Computation. Trends in Neurosciences. Vol. 27. 2004. PP. 712-19
- KOCH, Chr.: Biophysics of Computation. Information Processing in Single Neurons. Oxford University Press. New York. 1999
- KOCH, Chr.: The Quest for Consciousness. A Neurobiological Approach. Roberts. Denver/Co. 2004
- KOCH, Chr. / DOUGLAS, R.J. / WEHMEIER, U.: Visibility of a Synaptically Induced Conductance Changes: Theory and Simulations of Anatomically Characterized Cortical Pyramidal Cells. The Journal of Neuroscience. Vol. 10. 1990. PP. 1728-44
- KOCH, Chr. / SCHUSTER, H.: A Simple Network Showing Burst Synchronization without Frequency Locking. Neural Computation. Vol. 4. 1992. PP. 211-23
- KÖHLE, M.: Neuronale Netze. Springer-Verlag. Wien, New York. 1990
- KÖNIG, P.: A Method for the Quantification of Synchrony and Oscillatory Properties of Neuronal Activity. Journal of Neuroscience Methods. Vol. 54. 1994. PP. 31-37
- KÖNIG, P.: Zeitliche Kodierung in Neuronalen Netzen: Eigenschaften, Substrat und funktionelle Relevanz korrelierter Aktivität im visuellen System. Habilitationsschrift. Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt/Main. 1995

- KÖNIG, P. / SCHILLEN, Th.B.: Segregation of Oscillatory Responses by Conflicting Stimuli – Desynchronizing Connections in Neural Oscillator Layers. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): *Parallel Processing in Neural Systems and Computers*. Elsevier Science Inc. Amsterdam u.a. 1990. PP. 117-20
- KÖNIG, P. / SCHILLEN, Th.B.: Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. I. Synchronization. *Neural Computation*. Vol. 3. 1991. PP. 155-66
- KÖNIG, P. / JANOSCH, B. / SCHILLEN, Th.B.: Assembly Formation and Segregation by a Self-Organizing Neuronal Oscillator Model. In: Fr.H. EECKMAN / J.M. BOWER (Eds.): *Computation and Neural Systems*. Kluwer Academic Publishers. Boston, Dordrecht, London. 1993. PP. 509-13
- KÖNIG, P. / ENGEL, A.K. / LÖWEL, S. / SINGER, W.: Squint Affects Synchronization of Oscillatory Responses in Cat Visual Cortex. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 5. 1993. PP. 501-508
- KÖNIG, P. / ENGEL, A.K. / SINGER, W.: The Relation Between Oscillatory Activity and Long-Range Synchronization in Cat Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 92. 1995. PP. 290-94
- KÖNIGSBERGER, K.: *Analysis 2*. 4. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2002
- KOHONEN, T.: Analysis of a Simple Self-Organizing Process. *Biological Cybernetics*. Vol. 44. 1982. PP. 135-40
- KOHONEN, T.: Clustering, Taxonomy, and Topological Maps of Patterns. *Proceedings of the 6th International Conference of Pattern Recognition*, Munich. IEEE Computer Society Press. Silver Spring/MD. 1982. PP. 114-28
- KOHONEN, T.: Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*. Vol. 43. 1982. PP. 59-69 (reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): *Neurocomputing: Foundations of Research*. Chap. 30. MIT Press. 1988. PP. 511-22)
- KOHONEN, T.: *Self-Organization and Associative Memory*. Springer-Verlag. New York u.a. 1984
- KOHONEN, T.: *Self-Organizing and Associative Memory*. 2. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1988
- KOHONEN, T.: Physiological Interpretation of the Self-Organizing Map Algorithm. *Neural Networks*. Vol. 6. 1993. PP. 895-905
- KOHONEN, T.: *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1995
- KOHONEN, T.: The Self-Organizing Map. In: E. OJA (Ed.): *Neurocomputing. Special Volume on Self-Organizing Maps*. Vol. 21. 1998. PP. 1-6
- KOHONEN, T.: *Self-Organizing Maps*. 3. Ed. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2001
- KOHONEN, T.: Overture. In: U. SEIFFERT / L.C. JAIN (Eds.): *Self-Organizing Neural Networks. Recent Advances and Applications*. Physica-Verlag. Heidelberg, New York. 2002. PP. 1-12
- KOLB, Br. / WHISHAW, I.Qu.: *Fundamentals of Human Neuropsychology*. 5th Ed. Worth Publisher. New York. 2003 (dt.: *Neuropsychologie*. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1996)

- KOLEN, J.F.: Dynamical Systems and Iterated Function Systems. In: J.F. KOLEN / St.C. KREMER (Eds.): A Field Guide to Dynamical Recurrent Networks. IEEE Press. New York. 2001. PP. 83-102
- KOLMOGOROV, A.N.: Three Approaches to the Definition of the Concept "Quantity of Information". Problemy Peredachi Informatsii. Vol. 1. 1965. PP. 3-11 (in Russian)
- KOLMOGOROV, A.N.: Logical Basis for Information Theory and Probability Theory. IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 14. 1968. PP. 662-64
- KOLO, C. / CHRISTALLER, Th. / PÖPPEL, E.: Bioinformation. Problemlösungen für die Wissensgesellschaft. Physica-Verlag. Heidelberg. 1999
- KONDEPUDI, D.: Introduction to Modern Thermodynamics. Wiley. Chichester. 2008
- KONDEPUDI, D. / PRIGOGINE, I.: Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures. John Wiley & Sons. Chichester u.a. 1999. PP. 427-57
- KOPELL, N.: We Got Rhythm: Dynamical Systems of the Nervous System. Notices of the American Mathematical Society. Vol. 47. 2000. PP. 6-16
- KOPELL, N. / ERMENTROUT, B.: Symmetry and Phaselocking in Chains of Weakly Coupled Oscillators. Communications on Pure and Applied Mathematics. Vol. 39. 1986. PP. 623-60
- KOPPELBERG, D.: Die Aufhebung der analytischen Philosophie. Quine als Synthese von Carnap und Neurath. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1987
- KORB, K.B.: Symbolism and Connectionism. AI Back at a Join Point. Proceedings of the Conference on Information, Statistics and Induction in Science (ISIS'96). World Scientific. Singapore. 1996. PP. 247-57
- KORNWACHS, Kl.: Nichtklassische Systeme und das Problem der Emergenz. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 181- 231
- KORNWACHS, Kl. / JACOBY, K. (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verlag. Berlin. 1996
- KOSKO, B.: Neural Networks and Fuzzy Systems – A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall. London u.a. 1992
- KOSTAL, L. / LANSKY, P. / ROSPARS, J.-P.: Neuronal Coding and Spiking Randomness. European Journal of Neuroscience. Vol. 26. 2007. PP. 2693-2701
- KOZMA, R. / FREEMAN, W.J.: The KIV Model of Intentional Dynamics and Decision Making. Neural Networks. Vol. 22. 2009. PP. 277-85
- KRAFT, V.: Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. 2. Auflage. Springer-Verlag. Wien u.a. 1968
- KRALEMANN, Bj.Chr.: Umwelt, Kultur, Semantik – Realität. Eine Theorie umwelt- und kulturabhängiger semantischer Strukturen der Realität auf der Basis der Modellierung kognitiver Prozesse durch neuronale Netze. Leipziger Universitätsverlag. Kiel. 2006
- KRATKY, K.W.: Der Paradigmenwechsel von der Fremd- zur Selbstorganisation. In: K.W. KRATKY / F. WALLNER (Hrsg.): Grundprinzipien der Selbstorganisation. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1990. S. 3-17
- KRAUTH, L.: Die Philosophie Carnaps. Springer. Wien u.a. 1970

- KREITER, A.K. / SINGER, W.: Oscillatory Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 4. 1992. PP. 369-75
- KREITER, A.K. / SINGER, W.: Stimulus-Dependent Synchronization of Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 16. 1996. PP. 2381-96
- KRIEGER, D.J.: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. Fink. München. 1996
- KRÖGER, H.: Why are Probabilistic Laws Governing Quantum Mechanics and Neurobiology. *Chaos, Solitons and Fractals*. Vol. 25. 2005. PP. 815-34
- KROHN, W. / KÜPPERS, G. / PASLACK, R.: Selbstorganisation – Zur Genese und Entwicklung einer wissenschaftlichen Revolution. In: S.J. SCHMIDT (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt. 1987. S. 441-65
- KROHN, W. / KÜPPERS, G. (Hrsg): *Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*. Vieweg. Braunschweig und Wiesbaden. 1990
- KROHN, W. / CRUSE, H.: Das Prinzip der Autopoiesis. In: D. BAECKER: *Schlüsselwerke der Systemtheorie*. Verlag für Sozialwiss. Wiesbaden. 2005. S. 281-89
- KRUSCHKE, J.K.: Concept Learning and Categorization: Models. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 653-59
- KUHN, Th.S.: *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press. Chicago 1962 (dt.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 11. Aufl. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1991)
- KULENKAMPFF, J.: *David Hume*. 2. Aufl. Beck. München 1989
- KUMAR, A. / ROTTER, S. / AERTSEN, A.: Conditions for Propagating Synchronous Spiking and Asynchronous Firing Rates in a Cortical Network Model. *Journal of Neuroscience*. Vol. 28. 2008. PP. 5268-80
- KUO, D. / ELIASMITH, Chr.: Integrating Behavioral and Neural Data in a Model of Zebrafish Network Interaction. *Biological Cybernetics*. Vol. 93. 2005. PP. 178-87
- KURATOWSKI, K.: *Set Theory*. North Holland. Amsterdam. 1967
- KURFESS, F.: Konnektionismus. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 327-28
- KURTHEN, M.: *Neurosemantik. Grundlagen einer Praxiologischen Kognitiven Neurowissenschaft*. F. Enke Verlag. Stuttgart. 1992
- KURTHEN, M.: *Conscious Behaviour Explained. Consciousness and Cognition*. Vol. 8. 1999. PP. 155-58
- KUTSCHERA, Fr. von: *Gottlob Frege: Eine Einführung in sein Werk*. De Gruyter. Berlin. 1989
- KVASNIČKA, VI. / POSPÍČHAL, J.: Holographic Reduced Representation in Artificial Intelligence and Cognitive Science. *Manuscript*. 2004. PP. 1-32
- LAAKSO, A. / COTTRELL, G.: Content and Cluster Analysis. Assessing Representational Similarity in Neural Systems. *Philosophical Psychology*. Vol. 13. 2000. PP. 47-76

- LAAKSO, A. / COTTRELL, G.: Churchland on Connectionism. In: B.L. KEELEY (Ed.): Paul Churchland. Cambridge University Press. Cambridge. 2006. PP. 113-53
- LAI, Y.-C. / GREBOGI, C.: Complexity in Hamiltonian-Driven Dissipative Chaotic Dynamical Systems. *Physical Review E*. Vol. 54. 1996. PP. 4667-75
- LAKOFF, G.: What is a Conceptual System? In: W.F. OVERTON / D.S. PALERMO (Eds.): *The Nature and Ontogenesis of Meaning*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 41-90
- LAMME, V.A.F. / SPEKREIJSE, H.: Neuronal Synchrony does not Represent Texture Segregation. *Nature*. Vol. 396. 1998. PP. 362-66
- LANDAU, L-D. / LIFSHITZ, E.M.: *Fluid Mechanics*. Pergamon Press. Reading/MA, Addison-Wesley Publ. 1959
- LANE, P.C.R. / HENDERSON, J.B.: Simple Synchrony Networks: Learning to Parse Natural Language with Temporal Synchrony Variable Binding. In: L.F. NILSSON / M. BODEN / T. ZIEMKE: ICANN 98. Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Neural Networks. Skövde. Sweden. 2-4 September 1998. Vol. 2. Suhrkamp Verlag. Berlin. 1998. PP. 615-20
- LANG, Chr.B. / PUCKER, N.: *Mathematische Methoden in der Physik*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. 1998
- LANGACKER, R.W.: *Foundations of Cognitive Grammar*. Vol. 1. Stanford University Press. Stanford/CA. 1987
- LANGACKER, R.W.: *Foundations of Cognitive Grammar*. Vol. 2. Stanford University Press. Stanford/CA. 1991
- LÁSZLÓ, E.: *Introduction to Systems Philosophy. Toward a New Paradigm of Contemporary Thought*. Gordon & Breach. New York u.a. 1972
- LÁSZLÓ, E.: *The Systems View of the World. The Natural Philosophy of the New Developments in the Sciences*. Oxford. Blackwell. 1972
- LÁSZLÓ, E.: Evolution und Invarianz in der Sicht der allgemeinen Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: *Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm*. Athenäum Verlag. Königstein/Ts. 1978. S. 221-25
- LÁSZLÓ, E.: *The Systems View of the World: A Holistic Vision for Our Time*. Hampton Press. New York. 1996 (dt.: *Systemtheorie als Weltanschauung. Eine ganzheitliche Vision für unsere Zeit*. Diederichs. München. 1998)
- LAUENER, H.: *Willard Van Orman Quine*. Beck. München. 1982
- LAURENCE, St. / MARGOLIS, E.: Concepts and Cognitive Science. In: E. MARGOLIS / ST. LAURENCE (Eds.): *Concepts: Core Readings*. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 3-81
- LAURENT, G.: Dynamical Representation of Odors by Oscillating and Evolving Neural Assemblies. *Trends in Neurosciences*. Vol. 19. 1996. PP. 489-96
- LAURENT, G.: Olfactory Network Dynamics and the Coding of Multidimensional Signals. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 3. 2002. PP. 884-95
- LAURENT, G. / DAVIDOWITZ, H.: Encoding of Olfactory Information with Oscillating Neural Assemblies. *Science*. Vol. 265. 1994. PP. 1872-75
- LECOUTRE, Chr.: *Constraint Networks. Techniques and Algorithms*. ISTE. London. 2009

- LEIBNIZ, G.W.: Sämtliche Schriften und Briefe. Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Akademie-Verlag. Berlin. (1663-1703) 1923-2012
- LEIBNIZ, G.W. (neu übers., eingeleitet u. erl. von H. GLOCKNER): Monadologie. (Originaltitel: Principes de la Nature et de la Grâce fondés en Raison). Philipp Reclam. Stuttgart. (1714) 1986
- LEITGEB, H.: Interpreted Dynamical Systems and Qualitative Laws: From Neural Network to Evolutionary Systems. Synthese. Vol. 146. 2005. PP. 189-202
- LENK, H.: Wissenschaftstheoretische und philosophische Bemerkungen zur Systemtheorie. In: H. LENK: Pragmatische Philosophie. Plädoyers und Beispiele für eine praxisnahe Philosophie und Wissenschaftstheorie. Hoffmann und Campe Verlag. Hamburg. 1975. S. 247-67
- LENK, H.: Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm. Athenäum Verlag. Königstein/Ts. 1978. S. 239-69
- LENK, H.: Das Denken und sein Gehalt. R. Oldenbourg Verlag. München. 2001
- LENZEN, M.: Natürliche und künstliche Intelligenz. Einführung in die Kognitionswissenschaft. Campus Verlag. Frankfurt/ New York. 2002
- LENZEN, W.: Calculus universalis. Studien zur Logik von G. W. Leibniz. Mentis. Paderborn 2004
- LEPORE, E. / PYLYSHYN, Z.W. (Eds.): What is Cognitive Science? Blackwell Publishers. Malden/MA, Oxford/UK. 1999
- LESTIENNE, R.: Determination of the Precision of Spike Timing in the Visual Cortex of Anaesthetised Cats. Biological Cybernetics. Vol. 74. 1996. PP. 55-61
- LETTVIN, J.Y. / MATURANA, H.R. / McCULLOCH, W.S. / PITTS, W.H.: What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. Vol. 47. 1959. PP. 1940-51 (reprinted in: W.C. CORNING / M. BALABAN (Eds.): The Mind: Biological Approaches to its Functions. Interscience Publ. New York u.a. 1968. PP. 233-58. Vol. 47. 1959. PP. 1940-51)
- LEVELT, W.J.M.: Die konnektionistische Mode. Sprache & Kognition. Vol. 10. 1991. S. 61-72
- LEVIN, B. / PINKER, St.: Introduction. In: B. LEVIN / St. PINKER: Lexical and Conceptual Semantics. Blackwell. Cambridge/MA. 1991. PP. 1-7
- LEVINE, J.: Materialism and Qualia: The Explanatory Gap. Pacific Philosophical Quarterly. Vol. 64. 1983. PP. 354-61
- LEVY, S.D.: Changing Semantic Role Representations with Holographic Memory. In: Cl.T. MORRISON / T. OATES (Eds.): Computational Approaches to Representation Change during Learning and Development: Papers from the 2007 AAAI Symposium. Technical Report FS-07-04. AAAI Press. MenloPark/CA. 2007
- LEVY, S.D.: Analogical Integration of Semantic Roles with Vector Symbolic Architectures. In: Proceedings of the Workshop on Analogies: Integrating Multiple Cognitive Abilities (AnICA07). Nashville/TN. Publication Series of the Institute of Cognitive Science. University of Osnabrueck. 2007

- LEVY, S.D.: Becoming Recursive: Toward a Computational Neuroscience Account of Recursion in Language and Thought. In: H. van der HULST (Ed.): Recursion and Human Language. Mouton de Gruyter. Berlin u.a. 2009
- LEVY, S.D. / KIRBY, S.: Evolving Distributed Representations for Language with Self-Organizing Maps. In: Proceedings of the Third International Symposium on the Emergence and Evolution of Linguistic Communication (EELC). Rome/Italy. 25. Sep. - 1. Oct. 2006. Springer-Verlag. 2006
- LEVY, S.D. / GAYLER, R.: Vector Symbolic Architectures: A New Building Material for Artificial General Intelligence. Proceedings of the First Conference on Artificial General Intelligence (AGI-08). IOS Press. 2008. PP. 1-5
- LEWIS, R.L.: Cognitive Modeling, Symbolic. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 141-43
- LIAW, J.-Sh. / BERGER, Th.W.: Dynamic Synapse: A New Concept of Neural Representation and Computation. Hippocampus. Vol. 6. 1996. PP. 591-600
- LINDSAY, P.H. / NORMAN, D.A.: Human Information Processing. An Introduction to Psychology. Second Edition. Academic Press. New York, San Francisco, London. 1977
- LINKE, A. / NUSSBAUMER, M. / PORTMANN, P.R.: Studienbuch Linguistik. 4. Aufl. Max Niemeyer Verlag. Tübingen. 2001
- LISKE, M.-Th.: Gottfried Wilhelm Leibniz. Beck. München 2000
- LITZ, H.P.: Multivariate Statistische Methoden und ihre Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000
- LIVET, P.: Self-Organization in Second-Order Cybernetics: Deconstruction or Reconstruction of Complexity. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag. Dordrecht. 2006. PP. 249-63
- LOCHMANN, D.: Vom Wesen der Information: Eine allgemeinverständliche Betrachtung über Information in der Gesellschaft, in der Natur und in der Informationstheorie: 2. Aufl. Books on Demand. Norderstedt. 2006
- LÖWEL, S. / SINGER, W.: Selection of Intrinsic Horizontal Connections in the Visual Cortex by Correlated Neuronal Activity. Science. Vol. 255. 1992. PP. 209-12
- LOGOTHETIS, N.K. / PAULS, J. / POGGIO, T.: Shape Representation in the Inferior Temporal Cortex of Monkeys. Current Biology. Vol. 5. 1995. PP. 552-63
- LOOK, Br.C.: Gottfried Wilhelm Leibniz. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (May 15, 2009 Edition)
- LORENZ, K.: Kants Lehre vom apriorischen im Lichte gegenwärtiger Biologie. Blätter für Deutsche Philosophie. Bd.15. 1941. S. 94-125
- LORENZ, K.: Die angeborenen Formen möglicher Erfahrung. Zeitschrift für Tierpsychologie. Bd. 5. 1943. S. 235-409
- LORENZ, K.: Psychologie und Stammesgeschichte. In: K. LORENZ: Über tierisches und menschliches Verhalten. Bd. 2. 1954. S. 201-54
- LORENZ, K.: Die Rückseite des Spiegels. Versuch einer Naturgeschichte menschlichen Erkennens. Deutscher Taschenbuch Verlag. München. (1973) 1977

- LUGER, G. / STUBBLEFIELD, W.: Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 5th Ed. Pearson Education Limited. Harlow. 2005
- LUHMANN, N.: Funktionale Methode und Systemtheorie. Soziale Welt. Bd. 15. 1964. S. 1-25 (wiederabgedruckt in: N. LUHMANN: Soziologische Aufklärung. Bd.1. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme. 2. Aufl. Westdeutscher Verlag. Köln, Opladen. 1970. S. 31-53)
- LUHMANN, N.: Funktionen und Folgen formaler Organisation. 5. Aufl. Duncker & Humblot. Berlin. (1964) 1999
- LUHMANN, N.: Zweckbegriff und Systemrationalität. 5. Aufl. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1968) 1991
- LUHMANN, N.: Soziologische Aufklärung. Bd.1. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme. 2. Aufl. Westdeutscher Verlag. Köln, Opladen. 1970
- LUHMANN, N.: Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1984
- LUHMANN, N.: Die Wissenschaft der Gesellschaft. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1990
- LUMER, E.D. / EDELMAN, G.M. / TONONI, G.: Neural Dynamics in a Model of the Thalamocortical System, 1: Layers, Loops, and the Emergence of Fast Synchronous Rhythms. Cerebral Cortex. Vol. 7. 1997. PP. 207-27
- LUMER, E.D. / EDELMAN, G.M. / TONONI, G.: Neural Dynamics in a Model of the Thalamocortical System, 2: The Role of Neural Synchrony Tested Through Perturbations of Spike Timing. Cerebral Cortex. Vol. 7. 1997. PP. 228-36
- LUNGARELLA, M. / METTA, G. / PFEIFER, R. / SANDINI, G.: Developmental Robotics: A Survey. Connection Science. Vol. 15. 2003. PP. 151-90
- LYCAN, W.G.: Homuncular Functionalism Meets PDP. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 259-86
- LYRE, H.: Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung. Wilhelm Fink Verlag. München. 2002
- MAASS, W.: On the Computational Complexity of Networks of Spiking Neurons. In: G. TESAURO (Ed.): Eight Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). 28.11.-01.12. 1994, Denver/CO. Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 7. MIT Press. Cambridge/MA. 1995. PP. 183-90
- MAASS, W.: Lower Bounds for the Computational Power of Networks of Spiking Neurons. Neural Computation. Vol. 8. 1996. PP. 1-40
- MAASS, W.: Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. Neural Networks. Vol. 10. 1997. PP. 1659-71
- MAASS, W.: Computation with Spiking Neurons. In: W. MAASS / Chr. M. BISHOP (Eds.): Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. (1999). 2001. PP. 55-85
- MAASS, W.: Computation with Spiking Neurons. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1080-83

- MAASS, W.: Computing with Spikes. Special Issue on Foundations of Information Processing of TELEMATIK. Vol. 8. 2002. PP. 32-36
- MAASS, W.: Liquid Computing. In: S.B. COOPER / B. LÖWE / A. SORBI (Eds.): Proceedings of the Conference CiE'07: Computability in Europe 2007, Siena, Italy. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2007. PP. 507-16
- MAASS, W. / ZADOR, A.M.: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. In: Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 10. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 194-200
- MAASS, W. / ZADOR, A.M.: Computing and Learning with Dynamic Synapses. In: W. MAASS / Chr.M. BISHOP: Pulsed Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA. 1998. PP. 321-36
- MAASS, W. / ZADOR, A.M.: Dynamic Stochastic Synapses as Computational Units. Neural Computation. Vol. 11. 1999. PP. 903-17
- MAASS, W. / NATSCHLÄGER, T. / MARKRAM, H.: Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations. Neural Computation. Vol. 14. 2002. PP. 2531-60
- MacDONALD, C.: Classicism vs. Connectionism. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995. PP. 3-27
- MacDONALD, C. / MacDONALD, Gr. (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Volume Two. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995
- MACHAMER, P. / DARDEN, L. / CRAVER, C.: Thinking about Mechanisms. Philosophy of Science. Vol. 67. 2000. PP. 1-25
- MACHERY, E.: Doing without Concepts. Oxford University Press. New York. 2009
- MACHERY, E.: Precis of Doing without Concepts. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 33. 2010. PP. 195-244
- MacKAY, W.A.: Synchronized Neuronal Oscillations and their Role in Motor Processes. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 1. 1997. PP. 176-83
- MacLEOD, K. / LAURENT, G.: Distinct Mechanisms for Synchronization and Temporal Patterning of Odor-Encoding Neural Assemblies. Science. Vol. 274. 1996. PP. 976-79
- MAINZER, Kl.: Was ist Leben. Denkanstöße. Bd. 93. 1992. S. 43
- MAINZER, Kl.: Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und die Aufgabe der Philosophie. In: G. KAISER (Hrsg.): Kultur und Technik im 21. Jahrhundert. Campus Verlag. Frankfurt, New York. 1993. S. 118-31
- MAINZER, Kl.: Philosophical Foundations of Nonlinear Complex Systems. In: H. HAKEN / A. MIKHAILOV (Eds.): Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993. PP. 32-43
- MAINZER, Kl.: Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind. (5. Aufl.) Springer-Verlag. Berlin u.a. 1994 (2007)
- MAINZER, Kl.: Aufgaben, Ziele und Grenzen der Neurophilosophie. In: G. KAISER / D. MATEJOSKI / J. FEDROWITZ (Hrsg.): Neuroworlds: Gehirn – Geist – Kultur. Campus Verlag. Frankfurt, New York. 1994. S. 131-51

- MAINZER, Kl.: Quanten, Chaos und Selbstorganisation. Philosophische Aspekte des physikalischen Weltbildes. In: Kl. MAINZER / W. SCHIRMACHER (Hrsg.): Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik. BI-Wissenschaftsverlag Mannheim u.a. 1994. S. 21-72
- MAINZER, Kl.: Grundlagen, Erfolge und Grenzen mathematischer Modelle in der Gehirnforschung. In: Ethik und Sozialwissenschaften. Bd. 6. 1995. S. 103-105
- MAINZER, Kl.: Gehirn, Computer, Komplexität. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1997
- MAINZER, Kl.: G.W. Leibniz. In: K. v. MEYENN: Klassiker der Physik. Bd. I. Beck. München. 1997. S. 212-28
- MAINZER, Kl.: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999. S. 3-29
- MAINZER, Kl.: Leibniz und die moderne Informatik. In: H. POSER (Hrsg.): Akten des VII. Internationalen Leibniz-Kongresses: Nihil Sine Ratione – Mensch, Natur und Technik im Wirken von G.W. Leibniz. Berlin, 10-14. September 2001. 2002. S. 765-71
- MAINZER, Kl.: Cellular Neural Networks (CNN) and the Evolution of Complex Information Systems in Nature and Technology. In: R. TETZLAFF (Ed.): Cellular Neural Networks and their Applications. Proceedings of 7th IEEE International Workshop. World Scientific. New Jersey. 2002. PP. 483-97
- MAINZER, Kl.: KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 2003
- MAINZER, Kl.: Computerphilosophie zur Einführung. Junius Verlag. Hamburg. 2003
- MAINZER, Kl.: Self-Organization and Emergence in Complex Dynamical Systems. Interdisciplinary Perspectives for Organic Computing. In: P. DADAM / M. REICHERTS (Hrsg.): Informatik 2004 – Informatik verbindet. Bd. 2. Proceedings. GI-Edition Lecture Notes in Informatics. Gesellschaft für Informatik. Bonn. 2004. S. 590-94
- MAINZER, Kl.: Was sind komplexe Systeme? Komplexitätsforschung als integrative Wissenschaft. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 1. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2005. S. 37-77
- MAINZER, Kl.: Geist und Gehirn als komplexe Einheit. In: Gottfried Wilhelm Leibniz Gemeinschaft (Hrsg.): 2. Symposium zur Gründung der Deutsch-Japanischen Gesellschaft für Integrative Wissenschaft. J.H. Röll-Verlag. Bonn. 2006. S. 11-33
- MAINZER, Kl.: The Emergence of Self-Conscious Systems. From Symbolic AI to Embodied Robotics. In: L. LEWIS / T. METZLER (Eds.): Human Implications of Human-Robot Interaction. Templeton Foundation Press. Philadelphia. 2007. PP. 1-6
- From: <http://www.aai.org/Papers/Workshops/2006/WS-06-09/WS06-09-002.pdf>

- MAINZER, Kl.: Künstliche Intelligenz und die Zukunft der Philosophie des Geistes. In: P. SPÄT (Hrsg.): Zur Zukunft der Philosophie des Geistes. Mentis Verlag. Paderborn. 2007
- MAINZER, Kl.: Computer, künstliche Intelligenz und Theory of Mind: Modelle des Menschlichen? In: H. FÖRSTL (Hrsg.): Theory of Mind. Neurobiologie und Psychologie des sozialen Verhaltens. Springer Medizin Verlag. Heidelberg. 2007. S. 79-89
- MAINZER, Kl.: Komplexität. UTB. Paderborn. 2008
- MAINZER, Kl.: Organic Computing and Complex Dynamical Systems. Conceptual Foundations and Interdisciplinary Perspectives. In: R.P. WÜRTZ (Ed.): Organic Computing. Springer-Verlag. Berlin. 2008. PP. 105-22
- MAINZER, Kl.: Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz. Mentis Verlag. Paderborn. 2010
- MALLOT, H.A. / HÜBNER, W. / STÜRZL, W.: Neuronale Netze. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 84-124
- MALSBURG, Chr. von der: Self-Organization of Orientation Selective Cells in the Striate Cortex. Kybernetik. Vol. 14. 1973. PP. 85-100
- MALSBURG, Chr. von der: The Correlation Theory of Brain Function. Internal Report 81-2. Dept. of Neurobiology. Max-Planck-Institute of Biophysikal Chemistry. Göttingen. 1981
- MALSBURG, Chr. von der: Nervous Structures with Dynamical Links. Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie. Vol. 89. 1985. PP. 703-10
- MALSBURG, Chr. von der: Am I Thinking Assemblies? In: G. PALM / A. AERTSEN (Eds.): Brain Theory. Springer-Verlag. Berlin. 1986. PP. 161-76
- MALSBURG, Chr. von der: Synaptic Plasticity as Basis of Brain Organization. In: J.P. CHANGEUX / M. KONISHI (Eds.): The Neural and Molecular Bases of Learning. Report of the Dahlem Workshop on the Neural and Molecular Bases of Learning. Berlin 1985, December 8-13. Wiley. Chichester u.a. 1987. PP. 411-31
- MALSBURG, Chr. von der: Network Self-Organization. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. Academic Press. San Diego. 1990. PP. 421-32
- MALSBURG, Chr. von der: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 329-31
- MALSBURG, Chr. von der: Binding in Models of Perception and Brain Function. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. PP. 520-26
- MALSBURG, Chr. von der: Network Self-Organization in the Ontogenesis of the Mammalian Visual System. In: S.F. ZORNETZER / J. DAVIS / C. LAU (Eds.): An Introduction to Neural and Electronic Networks. 2nd Ed. Academic Press. San Diego. 1995. PP. 447-63
- MALSBURG, Chr. von der: The Binding Problem of Neural Networks. In: R.R. LLINÁS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 131-46

- MALSBURG, Chr. von der: The What and Why of Binding: The Modeler's Perspective. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 95-104
- MALSBURG, Chr. von der: Binding Problem, Neural Basis of. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 1178-80
- MALSBURG, Chr. von der: Self-Organization and the Brain. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1002-1005
- MALSBURG, Chr. von der: Dynamic Link Architecture. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 365-68
- MALSBURG, Chr. von der: How are Neural Signals Related to Each Other and to the World? *Journal of Consciousness Studies*. Vol. 9. 2002. PP. 47-60
- MALSBURG, Chr. von der / WILLSHAW, D.J.: How Patterned Neural Connections can be Set Up by Self-Organization. *Proceedings of the Royal Society of London*. Vol. B 194. 1976. PP. 431-45
- MALSBURG, Chr. von der / SCHNEIDER, W.: A Neural Cocktail-Party Processor. *Biological Cybernetics*. Vol. 54. 1986. PP. 29-40
- MALSBURG, Chr. von der / BIENENSTOCK, E.: A Neural Network for the Retrieval of Superimposed Connection Patterns. *Europhysics Letters*. Vol. 3. 1987. PP. 1243-49
- MALSBURG, Chr. von der / SINGER, W.: Principles of Cortical Network Organization. In: P. RAKIC / W. SINGER (Eds.): *Neurobiology of Neocortex*. 1988. PP. 69-99
- MANGOLD, R.: Die Simulation von Lernprozessen in konnektionistischen Netzwerken. In: N. BIRBAUMER et al. (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie*. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Ser. 2: Kognition. Bd. 7: Lernen. Hogrefe. Göttingen u.a. 1996. S. 389-444
- MANI, D.R.: The Design and Implementation of Massively Parallel Knowledge Representation and Reasoning Systems: A Connectionist Approach. Ph.D. Dissertation. Department of Computer and Information Science. University of Pennsylvania. 1995
- MANI, D.R. / SHASTRI, L.: A Connectionist Solution to the Multiple Instantiation Problem Using Temporal Synchrony. In: *Proceedings of the Fourteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. July 29 to August 1, 1992. Bloomington, Indiana. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1992. PP. 974-79
- MANI, D.R. / SHASTRI, L.: Reflexive Reasoning with Multiple Instantiation in a Connectionist Reasoning System with a Type Hierarchy. *Connection Science*. Vol. 5. 1993. PP. 205-42
- MARCUS, G.F.: *The Algebraic Mind*. Integrating Connectionism and Cognitive Science. Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA. 2001
- MARESCHAL, D. et al. (Eds.): *Neuroconstructivism*. 1. How the Brain Constructs Cognition. 2. Perspectives and Prospects. Oxford University Press. Oxford. 2007

- MARGOLIS, E. / LAURENCE, St.: The Ontology of Concepts – Abstract Objects or Mental Representations? *Noûs*. Vol. 41. 2007. PP. 561-93
- MARGOLIS, E. / LAURENCE, St.: Concepts. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (May 17, 2011 Edition).
From: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/concepts/>
- MARINELL, G.: *Multivariate Verfahren*. 4. Aufl. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien. 1995
- MARKMAN, A.B.: Conceptual Representations in Psychology. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 670-73
- MARKRAM, H. / WANG, Y. / TSODYKS, M.: Differential Signaling via the Same Axon of Neocortical Pyramidal Neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 95. 1998. PP. 5323-28
- MARR, D.: *Vision. A Computational Investigation into Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman and Company. San Francisco. 1982
- MARX, M.H.: Connectionism. In: R.J. CORSINI (Ed.): *Encyclopedia of Psychology*. 2nd Ed. Vol. 1. John Wiley & Sons. New York u.a. 1994. PP. 301-302
- MATHAR, R.: *Informationstheorie, diskrete Modelle und Verfahren*. Teubner-Verlag. Stuttgart. 1996
- MATTHEWS, R.J.: Three-Concept Monte: Explanation, Implementation and Systematicity. *Synthese*. Vol. 101. 1994. PP. 347-63
- MATTHEWS, R.J.: Can Connectionists Explain Systematicity? *Mind and Language*. Vol. 12. 2001. PP. 154-77
- MATTHEWS, R.J.: Connectionism and Systematicity. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 687-90
- MATTHIES, M.: *Einführung in die Systemwissenschaft*. Manuskript. WS 2002/03.
From: <http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/syswi/skript10.pdf>
- MATURANA, H.R.: Neurophysiology of Cognition. In: P. GARVIN (Ed.): *Cognition – A Multiple View*. New York, Washington. 1970. PP. 3-23
- MATURANA, H.R.: Biology of Cognition. BCL-Report Nr. 9.0. 1970. PP. 1-27
- MATURANA, H.R.: The Organization of the Living: A Theory of the Living Organization. *International Journal of Man-Machine Studies*. Vol. 7. 1975. PP. 313-32
- MATURANA, H.R.: Autopoiesis: Reproduction, Heredity and Evolution. In: M. ZELENY (Ed.): *Autopoiesis, Dissipative Structure, and Spontaneous Social Orders*. Westview Press. Boulder/CO. 1980. PP. 45-79
- MATURANA, H.R.: Wissenschaft und Alltagsleben: Die Ontologie der wissenschaftlichen Erklärung. In: W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg): *Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*. Vieweg. Braunschweig und Wiesbaden. 1990. S. 107-38

- MATURANA, H.R. / URIBE, G. / FRENK, S.G.: A Biological Theory of Relativistic Colour Coding in the Primate Retina. In: Archivos de Biología y Medicina Experimentales. Suplemento No. 1. Santiago. 1968. PP. 1-30 (dt.: Eine biologische Theorie der relativistischen Farbkodierung in der Primatenretina. In: H. MATURANA: Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1982. S. 88-137)
- MATURANA, H.R. / VARELA, Fr.: Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization. University of Illinois. Urbana/Ill. 1975 (dt.: Autopoietische Systeme. Eine Bestimmung der lebendigen Organisation. In: H. MATURANA: Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Ausgewählte Arbeiten zur biologischen Epistemologie. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1982. S. 170-235)
- MATURANA, H.R. / VARELA, Fr.: Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. D. Reidel. Boston, Dordrecht u.a. 1980
- MAURER, H.: Die Architekturtypen des „Self-Organizing (Feature) Map (SO(F)M)“ nach Teuvo Kohonen. BoD-Verlag. Norderstedt. (2004) 2009
- MAURER, H.: Das Subsymbolische Paradigma Paul Smolensky's vor dem Hintergrund der Symbolismus vs. Konnektionismus Debatte. BoD-Verlag. Norderstedt. (2006) 2009
- MAURER, H. / BOGDAN, M. / ROSENSTIEL, W.: Architecture Types of T. Kohonen's Self-Organizing Feature Map (SO(F)M). Manuscript. 2007
- MAYE, A.: Neuronale Synchronität, zeitliche Bindung und Wahrnehmung. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät für Elektrotechnik und Informatik. Berlin. 2002
- MAYE, A.: Correlated Neuronal Activity Can Represent Multiple Binding Solutions. Neurocomputing. Vol. 52-54. 2003. PP. 73-77
- MAYE, A. / WERNING, M.: Temporal Binding of Non-Uniform Objects. Neurocomputing. Vol. 58-60. 2004. PP. 941-48
- MAYE, A. / WERNING, M.: Neuronal Synchronization: From Dynamics Feature Binding to Compositional Representations. Chaos and Complexity Letters. Vol. 2. 2007. PP. 315-25
- MAYE, A. / ENGEL, A.K.: Neuronal Assembly Models of Compositionality. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 616-32
- MAYR, E.: Systematics and the Origin of Species. From the Viewpoint of a Zoologist. Dover. New York. (1942) 1964
- MAYR, E.: What Evolution is. Basic Books. New York. 2001
- McCLELLAND, J.L.: Cognitive Modeling, Connectionist. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 137-41
- McCLELLAND, J.L. / KAWAMOTO, A.H.: Mechanisms of Sentence Processing: Assigning Roles to Constituents of Sentences. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 272-325

- McCLELLAND, J.L. / RUMELHART, D.E. / HINTON, G.E.: The Appeal of Parallel Distributed Processing. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 3-44
- McCLELLAND, J.L. / VALLABHA, G.: Connectionist Models of Development: Mechanistic Dynamical Models with Emergent Dynamical Properties. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 3-24
- McCULLOCH, W.St. / PITTS, W.: A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics. Vol. 5. 1943. PP. 115-33
- McILWAIN, J.T.: Population Coding: A Historical Sketch. In: M.A.L. NICOLELIS (Ed.): Advances in Neural Population Coding. Elsevier. Amsterdam. 2001. PP. 3-7
- McLAUGHLIN, Br.P.: The Connectionism / Classicism Battle to Win Souls. Philosophical Studies. Vol. 71. 1993. PP. 163-90
- McLAUGHLIN, Br.P.: Systematicity, Conceptual Truth, and Evolution. In: Chr. HOOKWAY / D. PETERSON (Eds.): Philosophy and Cognitive Science. Cambridge University Press. 1993.
- McLAUGHLIN, Br.P.: Classical Constituents in Smolensky's ICS Architecture. In: M.L. DALLA CHIARA et al. (Eds.): Structures and Norms in Science. Volume Two of the Tenth International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science. Florence. August 1995. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/NL. 1997. PP. 331-43
- McLAUGHLIN, Br.P.: Connectionism. In: E. CRAIG (Ed.): Concise Routledge Encyclopedia of Philosophy. Routledge. London, New York. 1998. PP. 166-67
- McLAUGHLIN, Br.P. / WARFIELD, T.A.: The Allure of Connectionism Reexamined. Synthese. Vol. 101. 1994. PP. 365-400
- MEDIN, D.L. / SHOBEN, E.J.: Context and Structure in Conceptual Combination. Cognitive Psychology. Vol. 20. 1988. PP. 158-90
- MEDIN, D.L. / ORTONY, A.: Psychological Essentialism. In: S. VOSNIADOU / A. ORTONY (Eds.): Similarity and Analogical Reasoning. Cambridge University Press. New York. 1989. PP. 179-95
- MEDIN, D.L. / GOLDSTONE, R.L.: Concepts. In: M.W. EYSENCK (Ed.): The Blackwell Dictionary of Cognitive Psychology. Blackwell. Oxford u.a. 1990. PP. 77-83
- MEHROTRA, K. / MOHAN, Ch.K. / RANKA, S.: Elements of Artificial Neural Networks. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1997
- MEIBAUER, J.: Einführung in die germanistische Linguistik. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag. Stuttgart u.a. 2002
- MEINEL, R. / NEUGEBAUER, G. / STEUDEL, H.: Solitonen – Nichtlineare Strukturen. Akademie Verlag. Berlin. 1991
- MENGE, H. (Hrsg.): Langenscheidts Großwörterbuch Altgriechisch. Altgriechisch – Deutsch. 30. Aufl. Langenscheidt. Berlin u.a. 1913, 2001

- MENGE, H. (Hrsg.): Langenscheidt. Taschenwörterbuch Altgriechisch. Teil 1. Altgriechisch – Deutsch. Langenscheidt KG. Berlin u.a. 1986, 1993
- METCALFE EICH, J.: A Composite Holographic Associative Recall Model. *Psychological Review*. Vol. 89. 1982. PP. 627–61
- METZLER, W.: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1998
- MILLER, P.: *Theories of Developmental Psychology*. 5th Ed. Worth Publishers. 2011 (dt.: *Theorien der Entwicklungspsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg u.a. 1993)
- MILLIKAN, R.: *On Clear and Confused Ideas. An Essay about Substance Concepts*. Cambridge University Press. Cambridge. 2000
- MILLS, St.: Smolensky's Interpretation of Connectionism: The Implications for Symbolic Theory. *Irish Philosophical Journal*. 1990. PP. 104-18
- MILLS, St.: Wittgenstein and Connectionism: A Significant Complementarity? In: C. HOOKWAY / D. PETERSON (Eds.): *Philosophy and Cognitive Science*. Cambridge University Press. Cambridge. 1993. PP. 137-57
- MILNER, P.M.: A Model for Visual Shape Recognition. *Psychological Review*. Vol. 81. 1974. PP. 521-35
- MINSKY, M.: A Framework for Representing Knowledge. In: P.H. WINSTON (Ed.): *The Psychology of Computer Vision*. McGraw-Hill. New York. 1975. PP. 211-77
- MINSKY, M. / PAPER, S.: *Perceptrons*. 3rd Ed. MIT Press. Cambridge/MA. (1969) 1988
- MITTELSTRASS, J.: The Philosopher's Conception of Mathesis Universalis from Descartes to Leibniz. *Annals of Science*. Vol. 36. 1979. PP. 593-619
- MITTELSTRASS, J. / SCHROEDER-HEISTER, P.: Zeichen, Kalkül, Wahrscheinlichkeit. Elemente einer Mathesis universalis bei Leibniz. In: H. STACHOWIAK (Hrsg.): *Pragmatik. Handbuch pragmatischen Denkens*. Bd. I. Pragmatisches Denken von den Ursprüngen bis zum 18. Jahrhundert. Meiner. Hamburg. 1986. S. 392-414
- MORMANN, Th.: *Rudolf Carnap*. Beck. München. 2000
- MONTADA, L.: Die geistige Entwicklung aus der Sicht Jean Piagets. In: R. OERTER / L. MONTADA (Hrsg.): *Entwicklungspsychologie. Ein Lehrbuch*. Beltz Verlag, Psychologie Verlags Union. Weinheim. 1995. S. 518-60
- MONTAGUE, R.: *Universal Grammar*. *Theoria*. Vol. 36. 1970. PP. 373-98 (reprinted in: R.H. THOMASON (Ed.): *Formal Philosophy. Selected Papers of Richard Montague*. Yale University Press. New Haven. 1974. PP. 222-46)
- MONTEMURRO, M.A. / RASCH, M.J. / MURAYAMA, Y. / LOGOTHETIS, N.K. / PANZERI, St.: Phase-of-Firing Coding of Natural Visual Stimuli in Primary Visual Cortex. *Current Biology*. Vol. 18. 2008. PP. 375-80
- MOORE, B.: ART 1 and Pattern Clustering. In: D. TOURETZKY / G.E. HINTON / T.J. SEJNOWSKI (Eds.): *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*. Morgan Kaufmann. San Mateo/CA. 1989. PP. 174-85
- MOORE, W.J.: *Basic Physical Chemistry*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey. 1983 (dt.: *Grundlagen der Physikalischen Chemie*. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 1990)

- MORIN, E.: On Complexity. Hampton Press. Cresskill/NJ. 2008
- MORRIS, W.E.: David Hume. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (December 22, 2007 Edition)
- MÜLLER, B. / REINHARDT, J. / STRICKLAND, M.T.: Neural Networks. An Introduction. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1995
- MÜNCH, D.: Information. In: G. STRUBE (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta Verl. Stuttgart. 1996. S. 276-77
- MUNRO, P.W. / ANDERSON, J.A.: Tools for Connectionist Modeling: The Dynamical Systems Methodology. Behavior Research Methods, Instruments, and Computers. Vol. 20. 1988. PP. 276-81
- MURDOCK, B.B.: A Theory for the Storage and Retrieval of Item and Associative Information. Psychological Review. Vol. 89. 1982. PP. 316-38
- MURPHY, G.: The Big Book of Concepts. MIT Press. Cambridge/MA. 2002
- MURPHY, G. / MEDIN, D.: The Role of Theories in Conceptual Coherence. In: E. MARGOLIS / St. LAURENCE (Eds.): Concepts: Core Readings. MIT Press. Cambridge/MA. 1999. PP. 425-58
- MURTHY, V.N. / FETZ, E.E.: Coherent 25- to 35-Hz Oscillations in the Sensorimotor Cortex of Awake Behaving Monkeys. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 89. 1992. PP. 5670-74
- NADEL, L. (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1-4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003
- NAKAMURA, E.R. / MORI, T.: Was ist Komplexität? In: Kl. MAINZER: Komplexe Systeme and Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1999. S. 89-100
- NASE, G. / SINGER, W. / MONYER, H. / ENGEL, A.K.: Features of Neuronal Synchrony in Mouse Visual Cortex. Journal of Neurophysiology. Vol. 90. 2003. PP. 1115-23
- NEELAKANTA, P.S. / DE GROFF, D.F.: Neural Network Modeling. Statistical Mechanics and Cybernetic Perspective. CRC Press. Boca Raton u.a. 1994
- NEGRELLO, M. / HUELSE, M. / PASEMANN, Fr.: Adaptive Neurodynamics. In: Y. SHAN / A. YANG (Eds.): Applications of Complex Adaptive Systems. IGI Publishing. Hershey/PA. 2008. PP. 85-111
- NELKEN, I.: Analysis of the Activity of Single Neurons in Stochastic Settings. Biological Cybernetics. Vol. 59. 1988. PP. 201-15
- NELSON, J.I. / SALIN, P.A. / MUNK, M.H.J. / ARZI, M. / BULLIER, J.: Spatial and Temporal Coherence in Cortico-Cortical Connections: A Cross-Correlation Study in Areas 17 and 18 in the Cat. Visual Neuroscience. Vol. 9. 1992. PP. 21-37
- NEMETH, E.: Otto Neurath und der Wiener Kreis. Revolutionäre Wissenschaftlichkeit als politischer Anspruch. Campus-Verlag. Frankfurt u.a. 1981
- NETTEL, St. (Ed.): Wave Physics. Oscillations, Solitons, Chaos. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2009
- NEUENSCHWANDER, S. / SINGER, W.: Long-Range Synchronization of Oscillatory Light Responses in the Cat Retina and Lateral Geniculate Nucleus. Nature. Vol. 379. 1996. PP. 728-33

- NEUENSCHWANDER, S. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W. / VARELA, F.J.: Synchronization of Neuronal Responses in the Optic Tectum of Awake Pigeons. *Visual Neuroscience*. Vol. 13. 1996. PP. 575-84
- NEURATH, O. (R. HEGSELMANN (Hrsg.)): *Wissenschaftliche Weltauffassung, Sozialismus und logischer Empirismus*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. (1929) 1979
- NEURATH, O. (R. HALLER / H. RUTTE (Hrsg.)): *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften (Band 1 und 2)*. Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1981
- NEURATH, O. (R. HALLER / R. KINROSS (Hrsg.)): *Gesammelte bildpädagogische Schriften (Band 3)*. Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1991
- NEURATH, O. (R. HALLER / U. HÖFER (Hrsg.)): *Gesammelte ökonomische, soziologische und sozialpolitische Schriften (Band 4 und 5)*. Hölder-Pichler-Tempsky. Wien. 1998
- NEUSER, W.: Zur Logik der Selbstorganisation. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: *Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen*. Bouvier Verlag. Bonn. 1998. S. 15-34
- NEVEN, H. / AERTSEN, A.: Rate Coherence and Event Coherence in the Visual Cortex: A Neuronal Model of Object Recognition. *Biological Cybernetics*. Vol. 67. 1992. PP. 309-22
- NEWELL, A.: Physical Symbol Systems. *Cognitive Science*. Vol. 4. 1980. PP. 135-83
- NEWELL, A./ SIMON, H.A.: *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*. *Communications of the Association for Computing Machinery*. Vol. 19. 1976. PP. 113-26 (reprinted in: J. HAUGELAND (Ed.): *Mind Design II*. MIT Press. Cambridge/MA. 1997. PP. 81-110) (dt.: *Computerwissenschaft als empirische Forschung. Symbole und Lösungssuche*. In: D. MÜNCH (Hrsg.): *Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven*. Suhrkamp Verlag. 1992. S. 54-91)
- NEWHOUSE, S.E.: *Understanding Chaotic Dynamics*. In: J. CHANDRA (Ed.): *Chaos in Nonlinear Dynamical Systems*. SIAM. Philadelphia. 1984. PP. 1-11
- NEWMAN, J. / BAARS, B.J.: A Neural Attentional Model for Access to Consciousness: A Global Workspace Perspective. *Concepts in Neuroscience*. Vol. 4. 1993. PP. 255-90
- NICOLIS, Gr. / PRIGOGINE, I.: *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. Wiley. New York u.a. 1977
- NICOLIS, Gr. / PRIGOGINE, I.: *Exploring Complexity: An Introduction*. W.H. Freeman. San Francisco. 1989 (dt.: *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*. Piper. München, Zürich. 1987)
- NIEGEL, W.: Selbstorganisation – Annäherung an einen Begriff. In: W. NIEGEL / P. MOLZBERGER (Hrsg.): *Aspekte der Selbstorganisation*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1992. S. 1-18
- NIEGEL, W. / MOLZBERGER, P. (Hrsg.): *Aspekte der Selbstorganisation*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1992

- NIKLIASSON, L. / van GELDER, T.: Can Connectionist Models Exhibit Non-Classical Structure Sensitivity? In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 664-69
- NIKLIASSON, L. / BODÉN, M.: On Representing Structure and Structured Representations in Connectionist Networks. In: A. BROWNE (Ed.): Current Perspectives in Neural Computing. Institute of Physics. Bristol. 1997. PP. 20-50
From: <http://citeseer.ist.psu.edu/51563.html>
- NOELLE, D.C. / COTTRELL, G.W.: A Connectionist Model Of Instruction Following. In: Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. July 22-25, 1995. University of Pittsburgh. 1995. PP. 369-74
- NOELLE, D.C. / COTTRELL, G.W.: In Search of Articulated Attractors. In: G.W. COTTRELL (Ed.): Proceedings of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. July 12-15. 1996. University of California. San Diego. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1996. PP. 329-34
- NOELLE, D.C. / COTTRELL, G.W. / WILMS, Fr.R.: Extreme Attraction: The Benefits of Corner Attractors. Technical Report CS97-536, Department of Computer Science & Engineering, UCSD. 1997. PP. 1-27
- NOLFI, S. / FLOREANO, D.: Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines. MIT Press. Bradford Books. Cambridge/MA. 2001
- NOONAN, H.W.: Hume on Knowledge. Routledge. New York u.a. 1999
- NORMAN, K.A. / NEWMAN, E.L. / PEROTTE, A.J.: Methods for Reducing Interference in the Complementary Learning Systems Model: Oscillating Inhibition and Autonomous Memory Rehearsal. Neural Networks. Vol. 18. 2005. PP. 1212-28
- NORTHOFF, G.: Neurophilosophie – ein neuer Ansatz in der Philosophie. Information Philosophie. 2001. Bd. 1. S. 24-34
- NORTHOFF, G.: Was ist Neurophilosophie? Neurophilosophie zwischen Neurowissenschaften und Philosophie. In: C. KAMINSKY / O. HALLICH (Hrsg.): Verantwortung für die Zukunft. Zum 60. Geburtstag von Dieter Birnbacher. LIT Verlag. Berlin. 2006. S. 251-67
- NORTON, A.: Dynamics: An Introduction. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 45-68
- NOSOFSKY, R.M.: Exemplar-Based Accounts of Relations between Classification, Recognition and Typicality. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition. Vol. 14. 1988. PP. 700-708
- NYQUIST, H.: Certain Factors Affecting Telegraph Speed. Bell System Technical Journal. Vol. 3. 1924. PP. 324-46
- OBERMEIER, O.-P.: Das Konzept der Selbstorganisation in Niklas Luhmanns späten Entwürfen seiner allgemeinen Gesellschaftstheorie. In: R. BREUNINGER (Hrsg.): Selbstorganisation. Humboldt-Studienzentrum. Universität Ulm. KIZ Medienzentrum. 2008. S. 63-76

- OESER, E.: Wissenschaft und Information. Systematische Grundlagen einer Theorie der Wissenschaftsentwicklung. Bd. 1: Wissenschaftstheorie und empirische Wissenschaftsforschung. Bd. 2: Erkenntnis als Informationsprozeß. Bd. 3: Struktur und Dynamik erfahrungswissenschaftlicher Systeme. R. Oldenbourg Verlag. Wien, München. 1976
- OESER, E.: Der Informationsbegriff in der Philosophie und in der Wissenschaftstheorie. In: O.G. FOLBERTH / Cl. HACKL (Hrsg.): Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft. Wissenschaftliches Symposium der IBM Deutschland GmbH 3.-5. Dezember 1984 in Bad Neuenahr. München, Wien. 1986. S. 231-56
- OESER, E.: Die Selbstorganisation der Information im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß. In: K. GLOY / W. NEUSER / P. REISINGER: Systemtheorie. Philosophische Betrachtungen und ihre Anwendungen. Bouvier Verl. Bonn. 1998. S. 151-61
- O'GRADY, W.: Syntax: The Analysis of Sentence Structure. In: W. O'GRADY / M. DOBROVOLSKY / Fr. KATAMBA: Contemporary Linguistics. An Introduction. 3rd Ed. Addison Wesley Longman. Harlow u.a. 1997
- OPWIS, Kl. / LÜER, G.: Modelle der Repräsentation von Wissen. In: N. BIRBAUMER et al. (Hrsg.): Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Ser. 2: Kognition. Bd. 4: Gedächtnis. Hogrefe. Göttingen u.a. 1996. S. 337-431
- ORAM, M.W. / WIENER, M.C. / LESTIENNE, R. / RICHMOND, B.J.: Stochastic Nature of Precisely Timed Spike Patterns in Visual System Neuronal Responses. Journal of Neurophysiology. Vol. 81. 1999. PP. 3021-33
- VERTON, W.F.: General Systems, Structure and Development. In: K.F. RIEGEL / G.C. ROSENWALD (Eds.): Structure and Transformation. Developmental and Historical Aspects. Wiley. New York u.a. 1975. PP. 61-81
- PACHERIE, É.: Cognitivism. In: O. HOUDÉ et al. (Eds.): Dictionary of Cognitive Science. Neuroscience, Psychology, Artificial Intelligence, Linguistic, and Philosophy. Psychology Press. New York, Hove. 2004. P. 57
- PADULO, L. / ARBIB, M.A.: System Theory: A Unified State-Space Approach to Continuous and Discrete Systems. W.B. Saunders Co. Philadelphia/PA. 1974
- PAGIN, P.: Is Compositionality Compatible with Holism? Mind and Language. Vol. 12. 1997. PP. 11-33
- PAGIN, P.: Compositionality and Context. In: G. PREYER / G. PETER (Eds.): Contextualism in Philosophy: Knowledge, Meaning, and Truth. Oxford University Press. 2005
- PAGIN, P.: Meaning Holism. In: E. LEPORE / B. SMITH (Eds.): The Oxford Handbook of Philosophy of Language. Clarendon Press. Oxford. (2006) 2008. PP. 213-32
- PAGIN, P. / WESTERSTÅHL, D.: Compositionality. In: Kl. von HEUSINGER / Cl. MAIENBORN / P. PORTNER (Eds.): Semantics. An International Handbook of Natural Language Meaning. Vol. 1. Mouton de Gruyter. Berlin. 2008. PP. 96-123
- PAGIN, P. / WESTERSTÅHL, D.: Compositionality I. Definitions and Variants. Philosophy Compass. Vol. 5. 2010. PP. 265-82

- PAGIN, P. / WESTERSTÄHL, D.: Compositionality II. Arguments and Problems. *Philosophy Compass*. Vol. 5. 2010. PP. 250-64
- PALANCA, B.J.A. / DeANGELIS, G.C.: Does Neuronal Synchrony Underlie Visual Feature Grouping. *Neuron*. Vol. 46. 2005. PP. 333-46
- PALM, G.: *Neural Assemblies. An Alternative Approach to Artificial Intelligence*. Springer-Verlag. Berlin. 1982
- PALM, G.: Cell Assemblies as a Guideline for Brain Research. *Concepts in Neuroscience*. Vol. 1. 1990. PP. 133-37
- PALMER, E.: Fundamental Aspects of Cognitive Representation. In: E. ROSCH / B.B. LLOYD (Eds.): *Cognition and Categorization*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 259-303
- PALMER, S.E.: *Vision Science: Photons to Phenomenology*. MIT Press. Cambridge. 1999
- PAPINEAU, D.: Phenomenal and Perceptual Concepts. In: T. ALTER / Sv. WALTER (Eds.): *Phenomenal Concepts and Phenomenal Knowledge. New Essays on Consciousness and Physicalism*. Oxford University Press. Oxford. 2006. PP. 111-44
- PAPOULIS, A.: *Probability, Random, Variables, and Stochastic Processes*. 4th Ed. McGraw-Hill. New York. 1991
- PARASURAMAN, R.: Vigilance, Monitoring and Search. In: J.R. BOFF / L. KAUFMANN / J.P. THOMAS (Eds.): *Handbook of Human Perception and Performance*. Vol. 2. Cognitive Processes and Performance. Wiley. New York. 1986. PP. 41-49
- PAREIGIS, B.: *Lineare Algebra für Informatiker*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000
- PARK, N.S. / ROBERTSON, D. / STENNING, K.: An Extension of the Temporal Synchrony Solution to Dynamic Variable Bindings in a Connectionist System. *Knowledge-Based Systems*. Vol. 8. 1995. PP. 345-57
- PARSONS, T.: *The Social System*. The Free Press. Glencoe/Ill. 1951
- PARSONS, T.: *Social Systems and the Evolution of Action Theory*. The Free Press. New York. 1977
- PARTEE, B.H. / ter MEULEN, A. / WALL, R.E.: *Mathematical Methods in Linguistics*. Kluwer Academics Publishers. Dordrecht. 1990
- PASEMANN, Fr.: Neuromodules: A Dynamical Systems Approach to Brain Modelling. In: H.J. HERRMANN / D.E. WOLF / E. PÖPPEL (Eds.): *Workshop on Supercomputing in Brain Research. From Tomography to Neural Networks*. HLRZ, KFA Jülich, Germany, November 21-23, 1994. World Scientific Publishing Co. Singapore. 1995. PP. 331-48
- PASEMANN, Fr.: Repräsentation ohne Repräsentation. Überlegung zu einer Neurodynamik modularer kognitiver Systeme. In: G. RUSCH / S.J. SCHMIDT / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Interne Repräsentationen – Neue Konzepte der Hirnforschung*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 1996. S. 42-91
- PASEMANN, Fr. / STOLLENWERK, N.: Attractor Switching by Neural Control of Chaotic Neurodynamics. *Network: Computation in Neural Systems*. Vol. 9. 1998. PP. 549-61

- PASEMANN, Fr. / WENNEKERS, T.: Generalized and Partial Synchronization of Coupled Neural Networks. *Network: Computation in Neural Systems*. Vol. 11. 2000. PP. 41-61
- PASEMANN, Fr. / HILD, M. / ZAHEDI, K.: SO(2)-Networks as Neural Oscillators. In: J. MIRA / J.R. ALVAREZ (Eds.): *Computational Methods in Neural Modeling*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2003. PP. 144-51
- PASLACK, A.: *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas*. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden. 1991
- PAUEN, M.: *Grundprobleme der Philosophie des Geistes. Eine Einführung*. 3. Aufl. Fischer Taschenbuchverlag. Frankfurt. 2002
- PEAT, F.D.: *Die Entdeckung des Chaos*. München, Wien. 1990
- PELLETIER, F.J.: The Principle of Semantic Compositionality. *Topoi*. Vol. 13. 1994. PP. 11-24
- PELLETIER, F.J.: Holism and Compositionality. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 149-74
- PELLIONISZ, A. / LLINÁS, R. / PERKEL, D.H.: A Computer Model of the Cerebellar Cortex of the Frog. *Neuroscience*. Vol. 2. 1977. PP. 19-36
- PELLIONISZ, A. / LLINÁS, R.: Brain Modelling by Tensor Network Theory and Computer Simulation. *The Cerebellum: Distributed Processor for Predictive Coordination*. *Neuroscience*. Vol. 4. 1979. PP. 323-48
- PELLIONISZ, A. / LLINÁS, R.: Tensor Network Theory of the Metaorganization of Functional Geometries in the Central Nervous System. *Neuroscience*. Vol. 16. 1985. PP. 245-73
- PELZ, H.: *Linguistik. Eine Einführung*. 7. Aufl. Hoffmann und Campe. Hamburg. 2002
- PEREZ-ORIVE, J. / MAZOR, O. / TURNER, G.C. / CASSENAER, S. / WILSON, R.I. / LAURENT, G.: Oscillations and Sparsening of Odor Representations in the Mushroom Body. *Science*. Vol. 297. 2002. PP. 359-65
- PERKEL, D.H. / BULLOCK, Th.H.: Neural Coding: A Report Based on an NRP Work Session. *Neurosciences Research Program Bulletin*. Vol. 6. 1968. PP. 219-349
- PERKO, L.: *Differential Equations and Dynamical Systems*. 3rd Ed. Springer-Verlag. New York u.a. 2009
- PERLOVSKY, L.I.: Conundrum of Combinatorial Complexity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 20. 1998. PP. 666-70
- PERLOVSKY, L.I. / KOZMA, R.: Neurodynamics of Cognition and Consciousness. In: L.I. PERLOVSKY / R. KOZMA: *Neurodynamics of Cognition and Consciousness*. SPRINGER-Verlag. Berlin u.a. 2007. PP. 1-8
- PESCHL, M.: Repräsentation in natürlichen und künstlichen (konnektionistischen) neuronalen Systemen. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verlag. Stuttgart. 1996. S. 579-80
- PESCHL, M.F.: Epistemologische und methodologische Fragen an den traditionellen Repräsentationsbegriff in der klassischen Cognitive Science. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): *Repräsentationismus – was sonst?* Braunschweig. 1996. S. 119-38

- PETERMANN, Fr. / NIEBANK, K. / SCHEITHAUER, H.: Entwicklungswissenschaft. Entwicklungspsychologie – Genetik – Neuropsychologie. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2004
- PETERS, A. / PAYNE, B.R. (Eds.): The Cat Primary Visual Cortex. Academic Press. San Diego. 2002
- PETERSEN, W. / WERNING, M.: Conceptual Fingerprints: Lexical Decomposition by Means of Frames – A Neuro-Cognitive Model. In: U. PRISS / S. POLOVINA / R. HILL (Eds.): Conceptual Structures: Knowledge Architectures for Smart Applications. Springer-Verlag. Heidelberg. 2007. PP. 415-28
- PETITOT, J.: Why Connectionism is such a Good Thing: A Criticism of Fodor and Pylyshyn's Criticism of Smolensky. *Philosophica* (Belgium). Vol. 47. 1991. PP. 49-79
- PETITOT, J.: Dynamical Constituency. An Epistemological Analysis. *Sémiotiques*. Vol. 6. 1994. PP. 187-225
- PETITOT, J.: Morphodynamics and Attractor Syntax: Constituency in Visual Perception and Cognitive Grammar. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): *Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition*. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 227-81
- PETITOT, J.: Cognitive Morphodynamics. *Dynamical Morphological Models of Constituency in Perception and Syntax*. Peter Lang. Bern, Berlin u.a. 2011
- PEUKERT, H.: Kindliche Kalkulationen. Eine Computersimulation über den Einfluss stochastischer Informationen auf die Wortsegmentierung beim Erstspracherwerb. Dissertation. Universität Kassel. Fachbereich Sprach- und Literaturwissenschaft. Kassel University Press GmbH. Kassel. 2009
- PHILLIPS, W.A. / SINGER, W.: In Search of Common Foundations for Cortical Computation. *The Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 20. 1997. PP. 657-722
- PIAGET, J.: *Genetic Epistemology*. Columbia University Press. New York, London. 1970 (dt.: *Einführung in die genetische Erkenntnistheorie*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1973)
- PIAGET, J.: *Gesammelte Werke*. Bd. 1-8. Studienausgabe. Klett. Stuttgart. 1975
- PIAGET, J. / INHELDER, B.: *The Psychology of the Child*. Basic Books. New York. 1969 (dt.: *Die Psychologie des Kindes*. Walter. Olten, Freiburg i.Br. 1972)
- PIKOVSKY, A. / ROSENBLUM, M. / KURTHS, J.: Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press. Cambridge. 2001
- PINEL, J.P.J. / PAULI, P.: *Biopsychologie*. 6. Aufl. Pearson Studium. München u.a. 2007
- PINKER, St.: *Learnability and Cognition: The Acquisition of Argument Structure*. MIT Press. Cambridge/MA. 1989
- PINKER, St. / PRINCE, A.: On Language and Connectionism: Analysis of a Parallel Distributed Processing Model of Language Acquisition. In: St. PINKER / J. MEHLER (Eds.): *Connections and Symbols*. A Bradford Books. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1988. PP. 73-193 and in: *Cognition*. Vol. 28. 1988
- PIPA, G.: *The Neuronal Code: Development of Tools and Hypotheses for Understanding the Role of Synchronization of Neuronal Activity*. Dissertation. University of Technology. Berlin. 2006

- PIPA, G.: Our Brain Plays Jazz. Information Processing in a Self-Organized and Multi-Scale System. Video. Redwood Center for Theoretical Neuroscience. February 24, 2010
- PITT, D.: Mental Representation. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (July 21, 2008 Edition)
From: <http://plato.stanford.edu/entries/mental-representation/>
- PLATE, T.: Distributed Representations and Nested Compositional Structure. PhD Thesis. Department of Computer Science. University of Toronto. Toronto/Canada. 1994
- PLATE, T.: Holographic Reduced Representations. IEEE Transactions on Neural Networks. Vol. 6. 1995. PP. 623-41
- PLATE, T.A.: Structure Matching and Transformation with Distributed Representations. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 309-27
- PLATE, T.A.: A Common Framework for Distributed Representation Schemes for Compositional Structure. In: F. MAIRE / R. HAYWARD / J. DIEDERICH: Connectionist Systems for Knowledge Representation and Deduction. Queensland University of Technology Press. 1997. PP. 15-34
- PLATE, T.A.: Convolution-Based Memory Models. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2000. PP. 824-28
- PLATE, T.: Distributed Representations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1002-10
- PLATE, T.A.: Holographic Reduced Representations. Distributed Representation for Cognitive Structures. Center for the Study of Language and Information. Leland Stanford Junior University. Stanford/CA. 2003
- PLAUT, D.C.: Connectionist Modeling. In: A. KASDIN (Ed.): Encyclopedia of Psychology. Vol. 2. American Psychological Association and Oxford University Press. Washington/DC, New York. 2000. PP. 265-68
- PLAUT, D.C. / McCLELLAND, J.L.: Locating Object Knowledge in the Brain: A Critique of Bower's (2009) Attempt to Revive the Grandmother Cell Hypothesis. Psychological Review. Vol. 117. 2010. PP. 284-90
- POGGIO, T. / EDELMAN, S.: A Network that Learns to Recognize 3D Objects. Nature. Vol. 343. 1990. PP. 263-66
- POLLACK, J.B.: Recursive Distributed Representations. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 77-105
- POMPE, B.: Einführung in die Informationstheorie. Vorlesungsmanuskript. 1-semesterige Vorlesung für Studenten der Physik. Institut für Physik. Universität Greifswald. 2005. S. 1-112
- POPPER, K.R.: Logik der Forschung. 10. Aufl. Mohr. Tübingen. (1934) 1994
- POPPER, K.R.: Die offene Gesellschaft und ihre Feinde. Band 1: Der Zauber Platons. 8. Aufl. Mohr Siebeck. Tübingen. 2003

- POPPER, K.R.: Die offene Gesellschaft und ihre Feinde. Band 2: Falsche Propheten: Hegel, Marx und die Folgen. 8. Aufl. Mohr Siebeck. Tübingen. 2003
- POPPER, K.R. (W.W. BARTLEY III (Hrsg.)): Gesammelte Werke in deutscher Sprache. Mohr Siebeck. Tübingen. 2001-12
- PORT, R.F. : Dynamical System Hypothesis in Cognitive Science. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 1027-32
- PORT, R.F. / van GELDER, Th.J. (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995
- POSER, H.: Leibniz' Theorie der Perzeptionen heute. In: E. BARKE / R. WERNSTEDT / H. BREGER (Hrsg.): Leibniz neu denken. Steiner. Stuttgart. 2009
- POSNER, M.I. / SNYDER, Ch.R.R. / DAVIDSON, Br.J.: Attention and the Detection of Signals. Journal of Experimental Psychology: General. Vol. 109. 1980. PP. 160-74
- POSPECHILL, M.: Konnektionismus und Kognition. Eine Einführung. Kohlhammer Verlag. Stuttgart. 2004
- POUGET, A. / LATHAM, P.E.: Population Codes. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 893-97
- PRECHTL, J.C.: Visual Motion Induces Synchronous Oscillations in Turtle Visual Cortex. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 91. 1994. PP. 12467-71
- PRIBRAM, K.H.: Prolegomenon for a Holonomic Brain Theory. In: H. HAKEN / M. STADLER (Eds.): Synergetics of Cognition. Proceedings of the International Symposium at Schloß Elmau, Bavaria, June 4-8, 1989. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990. PP. 150-84
- PRIBRAM, K.H.: Brain and Perception. Holonomy and Structure in Figural Processing. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1991
- PRIGOGINE, I.: Etude Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles. Dunod. Paris. 1947
- PRIGOGINE, I.: Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. 3rd Ed. Wiley-Interscience. New York. (1955) 1967
- PRIGOGINE, I.: Non-Equilibrium Statistical Mechanics. Interscience Publishers. 1962
- PRIGOGINE, I.: From Being to Becoming. Freeman. San Francisco. 1980
- PRIGOGINE, I.: New Perspectives on Complexity. In: S. AIDA et al. (Eds.): The Science and Praxis of Complexity: Contributions to the Symposium held at Montpellier, France, 9-11 May, 1984. United Nations University. Tokyo. 1985 (reprinted in: G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 483-92)
- PRIGOGINE, I. / WIAME, J.M.: Biologie et Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles. Experientia. Tom. 2. 1946. PP. 451-53
- PRIGOGINE, I. / LEFEVER, R.: Theory of Dissipative Structures. In: H. HAKEN (Ed.): Synergetics. Cooperative Phenomena in Multikomponent Systems. Proceedings of the Symposium on Synergetics from April 30 to May 6, 1972, Schloß Elmau. Teubner. Stuttgart. 1973. PP. 124-35

- PRIGOGINE, I. / STENGERS, I.: Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. Piper. München, Zürich. (1986) 1990
- PRIGOGINE, I. / STENGERS, I.: Das Paradox der Zeit. Zeit, Chaos und Quanten. Piper. München u.a. 1993
- PRINCE, A. / SMOLENSKY, P.: Notes on Connectionism and Harmony Theory in Linguistics. Technical Report CU-CS-533-91. Department of Computer Science. Univ. of Colorado. Boulder. 1991
- PRINZ, J.: Furnishing the Mind. Concepts and their Perceptual Basis. MIT Press. Cambridge/MA. 2002
- PRINZ, J.: Concepts, Philosophical Issues about. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 659-66
- PRINZ, J.: Empiricism and State-Space Semantics. In: B.L. KEELEY (Ed.): Paul Churchland. Cambridge University Press. Cambridge. 2006. PP. 88-112
- PRINZ, J.J.: Regaining Composure: A Defense of Prototype Compositionality. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 437-53
- PRINZ, J. / BARSALOU, L.W.: Acquisition and Productivity in Perceptual Symbol Systems. An Account of Mundane Creativity. In: T. DARTNALL (Ed.): Creativity, Cognition, and Knowledge. Praeger. Westport/CT. 2002. PP. 105-38
- PRINZ, W.: Kognition, kognitiv. In: J. RITTER / K. GRÜNDER (Hrsg.): Historisches Wörterbuch der Philosophie. Bd. 4. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1976. S. 866-78
- PRUT, Y. / VAADIA, E. / BERGMANN, H. / HAALMAN, I. / SLOVIN, H. / ABELES, M.: Spatiotemporal Structure of Cortical Activity. Properties and Behavioral Relevance. Journal of Neurophysiology. Vol. 79. 1998. PP. 2857-74
- PULVERMÜLLER, Fr.: Word's in the Brain's Language. Behavioral and Brain Science. Vol. 22. 1999. PP. 253-70
- PUNTEL, L.B.: Struktur und Sein. Mohr Siebeck. Tübingen. 2006
- PURVES, D. et al. (Eds.): Principles of Cognitive Neuroscience. Sinauer Associates. Sunderland/MA. 2008
- PYLYSHYN, Z.W.: Computation and Cognition: Issues in the Foundations of Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 3. 1980. PP. 111-69
- PYLYSHYN, Z.W.: Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1985
- PYLYSHYN, Z.W. : The Role of Cognitive Architecture in Theories of Cognition. In: K. van LEHN (Ed.): Architectures for Intelligence. The Twenty-Second Carnegie Mellon Symposium on Cognition. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ, Hove, London. 1991. PP. 189-223
- QIU, F.T. / SUGIHARA, T. / von der HEYDT, R.: Figure-Ground Mechanisms Provide Structure for Selective Attention. Nature Neuroscience. 2007. Vol. 10. PP. 1492-99
- QUIAN QUIROGA, R. / KREIMAN, G. / KOCH, C. / FRIED, I.: Sparse but not "Grandmother-Cell" Coding in the Medial Temporal Lobe. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 12. 2008. PP. 87-91

- QUIAN QUIROGA, R. / PANZERI, S.: Extracting Information from Neural Populations: Information Theory and Decoding Approaches. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 10. 2009. PP. 173-85
- QUIAN QUIROGA, R. / KREIMAN, G.: Measuring Sparseness in the Brain: Comment on Bowers (2009). *Psychological Review*. Vol. 117. 2010. PP. 291-99
- QUINE, W. Van Orman: *Mathematical Logic*. Harvard University Press. Cambridge/MA. (1940) 1976
- QUINE, W. Van Orman: *From a Logical Point of View. Nine Logico-Philosophical Essays*. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1953
- QUINE, W. Van Orman: *Word and Object*. MIT Press. Cambridge/MA. 1960
- QUINE, W. Van Orman: *Philosophy of Logic*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1970
- QUINE, W. Van Orman: *Propositionale Gegenstände*. In: *Ontologische Relativität und andere Schriften*. Reclam. Stuttgart. 1975. S. 190-218
- QUINLAN, Ph.T.: *Connectionism and Psychology: A Psychological Perspective on New Connectionist Research*. Harvester Wheatsheaf. New York u.a. 1991
- RACHKOVSKIJ, D.A. / KUSSUL, E.M.: Binding and Normalization of Binary Sparse Distributed Representations by Context-Dependent Thinning. *Neural Computation*. Vol. 13. 2001. PP. 411-52
From: <http://cogprints.ecs.soton.ac.uk/archive/00001240/>
- RAMSCAR, M. / HAHN, U.: What Family Resemblance are not: The Continuing Relevance of Wittgenstein to the Study of Concepts and Categories. In: *Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Madison, Wisconsin. August, 1998. Erlbaum. Mahwah /NJ. 1998. PP. 865-70
- RAMSEY, W.: Connectionism, Philosophical Issues. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 186-88
- RAMSEY, W. / STICH, St. / GARON, J.: Connectionism, Eliminativism and the Future of Folk Psychology. *Philosophical Perspectives*. Vol. 4. 1990. PP. 499-533 (reprinted in: J.E. TOMBERLIN (Ed.): *Action Theory and Philosophy of Mind*. Ridgeview. Atascadero/CA. 1990 and in: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): *Philosophy and Connectionist Theory*. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 199-228 and in C. MacDONALD / Gr. MacDONALD: *Connectionism: Debates on Psychological Explanation*. Vol. 2. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1995. PP. 311- 38)
- RANTALA, V.: Connectionism and the Emergence of Propositional Knowledge. *Colloquium on Contemporary Topics in Philosophy of Science, Logic and Cognitive Science*. *Krisis. Philosophical Review*. Vol. 6. 1998. PP. 55-71
- RANTALA, V. / VADÉN, T.: Idealization in Cognitive Science. A Study in Counterfactual Correspondence. In: M. KUOKKANEN (Ed.): *Idealization VII: Structuralism, Idealization and Approximation*. Rodopi. Amsterdam, Atlanta/Ga. 1994. PP. 179-200

- RAPOPORT, A.: General System Theory. Essential Concepts & Applications. Abacus Press. Tunbridge Wells. 1986 (dt.: Allgemeine Systemtheorie. Wesentliche Begriffe und Anwendungen. Verlag Darmstädter Blätter. Darmstadt. 1988)
- RAUTERBERG, M.: Über das Phänomen: „Information“. In: B. BECKER (Hrsg.): Zur Terminologie in der Kognitionsforschung. Arbeitspapiere der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung Nr. 385. St. Augustin. 1989. S. 219-41
- RAVENS-CROFT, I.: Philosophie des Geistes. Reclam. Stuttgart. 2008
- READ, St.J. / VANMAN, E.J. / MILLER, L.C.: Connectionism, Parallel Constraint Satisfaction Processes, and Gestalt Principles: (Re)Introducing Cognitive Dynamics to Social Psychology. Personality and Social Psychology Review. Vol. 1. 1997. PP. 26-53
- RECANATI, Fr.: Compositinality, Flexibility, and Context-Dependence. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositinality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 175-91
- RECHENBERG, P.: Zum Informationsbegriff der Informationstheorie. Informatik Spektrum. Bd. 26. 2003. S. 317-26
- REGIER, T. : The Human Semantic Potential: Spatial Language and Constrained Connectionism. MIT Press. Cambridge/MA. 1996
- REGIER, T.: Computational Models of Cognition: Constraining. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 611-15
- REISBERG, D.: Cognition. Exploring the Science of the Mind. 3rd Ed. W.W. Norton & Company. New York, London. 2007
- RESCHER, N.: Leibniz: An Introduction to his Philosophy. Basil Blackwell. Oxford 1979
- REY, G.: An Explanatory Budget for Connectionism and Eliminativism. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 219-40
- REY, G.: The Unavailability of What we Mean: A Reply to Quine, Fodor, and Lepore. In: J.A. FODOR / E. LEPORE (Eds.): Holism: A Consumer Update. Rodopi B.V. Atlanta. 1993. PP. 61-101
- REY, G.: Concepts. In: S. Guttenplan (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell. Cambridge/MA. 1994. PP. 185-93
- REY, G.: Contemporary Philosophy of Mind. A Contentiously Classical Approach. Blackwell. Cambridge/MA. Oxford/UK. 1997
- REY, G.: Language of Thought. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 753-60
- REY, G.D. / WENDER, K.F.: Neuronale Netze. Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Aufl. Huber. Bern. 2011
- REYES, A.D. / FETZ, E.E.: Effects of Transient Depolarizing Potentials on the Firing Rate of Neocortical Neurons. Journal of Neurophysiology. 1993. PP. 1673-83
- RIEDL, R.: Die Ordnung des Lebendigen. Systembedingungen der Evolution. Piper. München, Zürich. (1975) 1990

- RIEDL, R.: The System Theory of Evolution. In: F. SCHMIDT (Hrsg.): Neodarwinistische oder Kybernetische Evolution? Bericht über ein internationales Symposium vom 15.-17. Juli 1987 in Heidelberg. Universitätsdruckerei. Heidelberg. 1988. S. 4-29
- RIEDL, R.: Strukturen der Komplexität: Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 2000
- RIEDL, R.: Systems Theory of Evolution. *Evolution and Cognition*. Vol. 9. 2003. PP. 31-42
- RIEHLE, A. / GRÜN, S. / DIEMANN, M. / AERTSEN, A.: Spike Synchronization and Rate Modulation Differentially Involved in Motor Cortical Function. *Science*. Vol. 278. 1997. PP. 1950-53
- RIEKE, Fr. / WARLAND, D. / de RUYTER VAN STEVENINCK, R. / BIALEK, W.: Spikes: Exploring the Neural Code. MIT Press. Cambridge/MA. 1997
- RIESENHUBER, M. / POGGIO, T.: Hierarchical Models of Object Recognition in Cortex. *Nature Neuroscience*. Vol. 2. 1999. PP. 1019-25
- RIESENHUBER, M. / POGGIO, T.: Are Cortical Models Really Bound by the "Binding Problem"? *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 87-93
- RILEY, M.S. / SMOLENSKY, P.: A Parallel Model of (Sequential) Problem Solving. In: W. KINTSCH (Ed.): *Proceedings of the Sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Boulder, Colorado. August, 1984. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1984. PP. 286-92
- RINNE, H.: *Statistische Analyse multivariater Daten. Einführung*. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000
- RISSANEN, J.: Information Theory and Neural Nets. In: P. SMOLENSKY / M. MOZER / D.E. RUMELHART (Eds.): *Mathematical Perspectives on Neural Networks*. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1996. PP. 567-602
- RITTER, H. / KOHONEN, T.: Self-Organizing Semantic Maps. *Biological Cybernetics*. Vol. 61. 1989. PP. 241-54
- RITTER, H. / MARTINETZ, Th. / SCHULTEN, Kl.: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*. Addison-Wesley Publishing Company. Bonn u.a. 1990 (engl.: *Neural Computation and Self-Organizing Maps: An Introduction*. Addison-Wesley. Reading/MA. 1992)
- ROBBINS, P.: How to Blunt the Sword of Compositionality. *Noûs*. Vol. 36. 2002. PP. 313-34
- ROBINSON, R.C.: *An Introduction to Nonlinear Dynamical Systems. Continuous and Discrete*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River/NJ. 2004
- ROCKWELL, W.T.: Attractor Spaces as Modules: A Semi-Eliminative Reduction of Symbolic AI to Dynamic Systems Theory. *Minds and Machines*. Vol. 15. 2005. PP. 23-55
- RODRIGUEZ, E. / GEORGE, N. / LACHAUX, J.-Ph. / MARTINERIE, J. / RENAULT, B. / VARELA, Fr.J.: Perception's Shadow: Long-Distance Synchronization of Human Brain Activity. *Nature*. Vol. 397. 1999. PP. 430-33
- ROELFSEMA, P.R. / KÖNIG, P. / ENGEL, A.K. / SIRETEANU, R. / SINGER, W.: Reduced Synchronization in the Visual Cortex of Cats with Strabismic Amblyopia. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 6. 1994. PP. 1645-55

- ROELFSEMA, P.R. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Interareal Synchronization Between the Visual, Parietal and Motor Cortex of the Awake Cat. *European Journal of Neuroscience*. Supplement 8. 1995. P. 112
- ROELFSEMA, P.R. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / SINGER, W.: Visuomotor Integration is Associated with Zero Time-Lag Synchronization Among Cortical Areas. *Nature*. Vol. 385. 1997. PP. 157-61
- ROELFSEMA, P.R. / LAMME, V.A. / SPEKREIJSE, H.: Synchrony and Covariation of Firing Rates in the Primary Visual Cortex During Contour Grouping. *Nature Neuroscience*. Vol. 7. 2004. PP. 982-91
- RÖSLER, Fr.: *Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011
- ROJAS, R.: *Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1993
- ROMBA, M.: *Kognitive Strukturierung und Symbolorientierter Konnektionismus. Vergleichende Darstellung ausgewählter kognitiver Prozesse mit symbolverarbeitenden und konnektionistischen Modellen. Eine modelltheoretische Untersuchung*. Rainer Hampp Verlag. München/Mering. 2001
- RONALD, R.W. / KOCH, B.-P. / POMPE, B.: *Chaos in dissipativen Systemen*. 2. Aufl. Akademie-Verlag. Berlin. 1994
- ROPOHL, G.: Einführung in die allgemeine Systemtheorie. In: H. LENK / G. ROPOHL (Hrsg.): *Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm*. Athenäum Verlag. Königstein/Ts. 1978. S. 9-49
- ROPOHL, G.: *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie*. Carl Hanser Verlag. München, Wien. 1979
- ROPOHL, G.: *Allgemeine Systemtheorie als transdisziplinäre Integrationsmethode. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. Nr. 2. Jg. 14. 2005. S. 24-31
- ROSCH, E.: Cognitive Representations of Semantic Categories. *Journal of Experimental Psychology: General*. Vol. 104. 1975. PP. 192-232
- ROSCH, E.: Prototype Classification and Logical Classification: The Two Systems. In: E. SCHOLNIK (Ed.): *New Trends in Cognitive Representation: Challenges to Piaget's Theory*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 73-86
- ROSCH, E.: Principles of Categorization. In: E. ROSCH / B. LLOYD (Eds.): *Cognition and Categorization*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale/NJ. 1978. PP. 27-48
- ROSCH, E.: Prototype Classification and Logical Classification: The two Systems. In: E.K. SCHOLNICK (Ed.): *New Trends in Conceptual Representation: Challenges to Piaget's Theory*. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1983. PP. 73-86
- ROSCH, E. / MERVIS, C.: Family Resemblances: Studies in the Internal Structure of Categories. *Cognitive Psychology*. Vol. 7. 1975. PP. 573-605
- ROSCH, E. / MERVIS, C.B. / GRAY, W.D. / JOHNSON, D.M. / BOYES-BRAEM, P.: Basic Objects in Natural Categories. *Cognitive Psychology*. Vol. 8. 1976. PP. 382-439

- ROSENBERG, J.F.: Connectionism and Cognition. Report No. 1/1989. Research Group on Mind and Brain. Perspectives in Theoretical Psychology and the Philosophy of Mind. University of Bielefeld. 1989. PP. 1-28
- ROSENBERG, J.F.: Treating Connectionism Properly: Reflections on Smolensky. Report No. 9/1989. Research Group on Mind and Brain. Perspectives in Theoretical Psychology and the Philosophy of Mind. University of Bielefeld. 1989. PP. 1-40
- ROSENBLATT, Fr.: The Perceptron. A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. Psychological Reviews. Vol. 65. 1958. PP. 386-408 (reprinted in: J.A. ANDERSON / E. ROSENFELD (Eds.): Neurocomputing: Foundations of Research. Chap. 8. MIT Press. Cambridge/MA. 1988. PP. 92-114)
- ROSENBLATT, Fr.: Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanism. Spartan Books. Washington D.C. 1962
- ROSKIES, A.L.: Introduction: The Binding Problem. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 7-9
- ROTH, G.: Kognition: Die Entstehung von Bedeutung im Gehirn. In: W. KROHN / G. KÜPPERS (Hrsg.): Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt. 1992
- ROTH, G.: Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Suhrkamp Verlag. Frankfurt. 1994
- ROTTER, M. / DORFFNER, G.: Struktur und Konzeptrelationen in verteilten Netzwerken. In: G. DORFFNER (Hrsg.): Konnektionismus in Artificial Intelligence und Kognitionforschung. Proceedings 6. Österreichische Artificial Intelligence-Tagung (KONNAI). Salzburg, Österreich. 18-21 September 1990. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1990. S. 85-94
- RUMELHART, D.E.: Schemata: The Building Blocks of Cognition. In: R.J. SPIRO / B.C. BRUCE / W.F. BREWER (Eds.): Theoretical Issues in Reading Comprehension. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1980. PP. 33-58
- RUMELHART, D.E. / McCLELLAND, J.L. (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986
- RUMELHART, D.E. / McCLELLAND, J.L. (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986
- RUMELHART, D.E. / HINTON, G.E. / WILLIAMS, R.J.: Learning Internal Representations by Error Propagation. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 318-62
- RUMELHART, D.E. / SMOLENSKY, P. / HINTON, G.E. / McCLELLAND, J.L.: Schemata and Sequential Thought Processes in PDP Models. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 7-57
- RUSSELL, B.: The Philosophy of Logical Atomism. Open Court. LaSalle. 1918/19. In: J.G. SLATER (Ed.): Bertrand Russell. The Philosophy of Logical Atomism and other Essays. The Collected Papers. Vol. 8. (1914-19) 1986

- RUSSELL, B.: The Collected Papers of Bertrand Russell. George Allen & Unwin / Routledge. London u.a. 1984-2008
- RUSSELL, J.: What is Language Development? Rationalist, Empiricist, and Pragmatist Approaches to the Acquisition of Syntax. Oxford Univ. Press. Oxford. 2nd Ed. 2005
- RYDER, D. / FAVOROV, O.V.: The New Associationism: A Neural Explanation for the Predictive Power of Cerebral Cortex. Brain and Mind. Vol. 2. 2001. PP. 161-94
- SAKURAI, Y.: How do Cell Assemblies Encode Information in the Brain? Neuroscience Biobehavioral Reviews. Vol. 23. 1999. PP. 785-96
- SALARI, N. / MAYE, A.: Brain Waves: How Synchronized Neuronal Oscillations Can Explain the Perception of Illusory Objects. VDM Verlag Dr. Müller. Saarbrücken. 2008
- SALIN, P.A. / BULLIER, J.: Corticocortical Connections in the Visual System: Structure and Funktion. Physiological Reviews. Vol. 75. 1995. PP. 107-54
- SANDU, G.: Compositionality and the Context Principle. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 262-78
- SAPOJNIKOVA, E.: ART-Based Fuzzy Classifiers. ART Fuzzy Networks for Automatic Classification. Cuvillier Verlag. Göttingen. 2004
- SATO, T.: Interactions of Visual Stimuli in the Receptive Fields of Inferior Temporal Neurons in Awake Monkeys. Experimental Brain Research. Vol. 77. 1989. PP. 23-30
- SCHANK, R.C. / ABELSON, R.: Scripts, Plans, Goals and Understanding. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1977
- SCHARLAU, I.: Jean Piaget zur Einführung. Junius Verlag. Hamburg 1996
- SCHECHTER, B.: How the Brain Gets Rhythm. Science. Vol. 274. 1996. PP. 339-40
- SCHECK, Fl.: Theoretische Physik 1. Mechanik. Von den Newton'schen Gesetzen zum deterministischen Chaos. 8. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2007
- SCHEERER, E.: Towards a History of Cognitive Science. International Social Science Journal. Bd. 115. 1988. PP. 7-18
- SCHEERER, E.: Symbolverarbeitung und Konnektionismus: Eine Kontroverse ohne Ende? In: B. BECKER (Hrsg.): Zur Terminologie der Kognitionsforschung. Workshop in der GMD 16-18. November 1988. 1989. S.112-23
- SCHEERER, E.: Philosophische Begeisterung für den Konnektionismus: Etwas mehr Skepsis, bitte? In: B. BECKER (Hrsg.): Zur Terminologie der Kognitionsforschung. Workshop in der GMD 16-18. November 1988. 1989. S.136-48
- SCHEERER, E.: Symbolverarbeitung und Konnektionismus: Von der Konfrontation zur Koexistenz. Universität Bielefeld. Zentrum für interdisziplinäre Forschung (ZfiF. UB). Forschungsgruppe Mind and Brain: Perspectives in Theoretical Psychology and the Philosophy of Mind. No. 66. 1990. S. 1-35
- SCHEINERMAN, E.R.: Invitation to Dynamical Systems. Department of Mathematical Sciences. The Johns Hopkins University. Internet Version. 2000 From: <http://www.ams.jhu.edu/~ers/book.pdf>
- SCHERER, A.: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Vieweg. Braunschweig, Wiesbaden. 1997

- SCHERZ, U.: Quantenmechanik. Eine Einführung mit Anwendungen auf Atome, Moleküle und Festkörper. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig. 1999
- SCHIEPEK, G.: Die Grundlagen der Systemischen Therapie. Theorie – Praxis – Forschung. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1999
- SCHIEPEK, G.: Die neuronale Selbstorganisation des Selbst. Ein Beitrag zum Verhältnis von neuronalen und mentalen Prozessen aus der Sicht der Synergetik. In: Fr. RESCH / M. SCHULTE-MARKWORT (Hrsg.): Kursbuch für integrative Kinder- und Jugendpsychiatrie. Schwerpunkt: Psyche und Soma. Beltz-PVU. Weinheim. 2006. S. 5-22
- SCHIEPEK, G.: Complexity and Nonlinear Dynamics in Psychotherapy. European Review. Vol. 17. 2009. PP. 331-56
- SCHIEPEK, G. / STRUNK, G.: Dynamische Systeme. Grundlagen und Analysemethoden für Psychologen und Psychiater. Roland Asanger Verlag. Heidelberg. 1994
- SCHIEPEK, G. / TSCHACHER, W. (Hrsg.): Selbstorganisation in Psychologie und Psychiatrie. Vieweg Verlag. Braunschweig. 1997
- SCHIERWAGEN, A.: Modelle der Neuroinformatik als Mittler zwischen neurowissenschaftlichen Fakten und Kognitionstheorien. In: J.F. MAAS: Das sichtbare Denken. Modelle und Modellhaftigkeit in der Philosophie und den Wissenschaften. Editions Rodopi B.V. Amsterdam, Atlanta/GA. 1993. S. 131-52
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Coherency Detection by Coupled Oscillatory Responses – Synchronizing Connections in Neural Oscillator Layers. In: R. ECKMILLER / G. HARTMANN / G. HAUSKE (Eds.): Parallel Processing in Neural Systems and Computers. Elsevier Science Inc. Amsterdam u.a. 1990. PP. 139-42
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Coherency Detection and Response Segregation by Synchronizing and Desynchronizing Delay Connections in a Neuronal Oscillator Model. In: IEEE Neural Networks Council (Ed.): International Joint Conference on Neural Networks. Vol. II. San Diego/CA. 1990. PP. 387-95
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Temporal Coding by Coherent Oscillations as a Potential Solution to the Binding Problem: Neural Network Simulations. In: H.G. SCHUSTER (Ed.): Nonlinear Dynamics and Neuronal Networks. VCH Weinheim. New York, Basel, Cambridge. 1991. PP. 153-71
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. II. Desynchronization. Neural Computation. Vol. 3. 1991. PP. 167-77
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Temporal Structure can Solve the Binding Problem for Multiple Feature Domains. In: Fr.H. EECKMAN / J.M. BOWER (Eds.): Computation and Neural Systems. Kluwer Academic Publishers. Boston, Dordrecht, London. 1993. PP. 503-507
- SCHILLEN, Th.B. / KÖNIG, P.: Binding by Temporal Structure in Multiple Feature Domains of an Oscillatory Neuronal Network. Biological Cybernetics. Vol. 70. 1994. PP. 397-405
- SCHLESINGER, M.: A Lesson from Robotics: Modeling Infants as Autonomous Agents. Adaptive Behavior. Vol. 11. 2003. PP. 97-107

- SCHLESINGER, M.: Evolving Agents as a Metaphor for the Developing Child. *Developmental Science*. Vol. 7. 2004. PP. 154-68
- SCHLESINGER, M.: The Robot as a New Frontier for Connectionism and Dynamic Systems Theory. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 182-99
- SCHLESINGER, M. / PARISI, D.: The Agent-Based Approach: A New Direction for Computational Models of Development. *Developmental Review*. Vol. 21. 2001. PP. 121-46
- SCHLICHTING, H.J.: Von der Dissipation zur dissipativen Struktur. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik*. Bd. 49. 2000. S. 12-16
- SCHLICK, M.: *Allgemeine Erkenntnislehre*. Springer-Verlag. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. (1918, 1925) 1979
- SCHLICK, M.: *Moritz Schlick Gesamtausgabe*. Springer Verlag. Wien, New York. 2006-2009
- SCHMID, U. / KINDSMÜLLER, M.Chr.: *Kognitive Modellierung. Eine Einführung in die logischen und algorithmischen Grundlagen*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 1996
- SCHMIDT, S.J.: Der Radikale Konstruktivismus: Ein neues Paradigma im interdisziplinären Diskurs. In: S.J. SCHMIDT (Hrsg.): *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1987. S. 11-88
- SCHÖNER, Gr.: *Dynamical Systems Approaches to Cognition*. In: R. SUN (Ed.): *The Cambridge Handbook of Computational Psychology*. Cambridge University Press. Cambridge. 2008. PP. 101-26
- SCHÖNER, Gr.: *Development as Change of Systems Dynamics: Stability, Instability, and Emergence*. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2009. PP. 25-47
- SCHÖNING, U.: *Theoretische Informatik – kurzgefaßt*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. 1997
- SCHOLZ, H.: *Leibniz. Jahrbuch der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaft*. 1942. S. 205-49 (wiederabgedruckt in: A. HEINEKAMP / Fr. SCHUPP (Hrsg.): *Leibniz' Logik und Metaphysik*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt 1988. S. 118-51)
- SCHRÖDER, J.: *Knowledge of Rules, Causal Systematicity, and Language of Thought*. *Synthese*. Vol. 117. 1998. PP. 313-30
- SCHRÖDER, J.: *Die Sprache des Denkens*. Verlag. Königshausen und Neumann GmbH. Würzburg 2001
- SCHRÖDINGER, E.: *Was ist Leben?* 3. Aufl. Piper. München. 1989
- SCHWABL, Fr.: *Statistische Mechanik*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000
- SCHWEITZER, Fr.: *Selbstorganisation und Information*. In: H. KRAPP / Th. WAGENBAUR (Hrsg.): *Komplexität und Selbstorganisation – „Chaos“ in Natur- und Kulturwissenschaften*. Wilhelm Fink Verlag. München. 1997. S. 99-129

- SCHWENDER, D. / MADLER, C. / KLASING, S. / PETER, K. / PÖPPEL, E.: Anesthetic Control of 40-Hz Brain Activity and Implizit Memory. *Consciousness and Cognition*. Vol. 3. 1994. PP. 129-47
- SCHUSTER, H. / WAGNER, P.: A Model for Neuronal Oscillations in the Visual Cortex. *Biological Cybernetics*. Vol. 64. 1990. PP. 77-82
- SEDLACEK, Kl.-D. et al.: *Emergenz. Strukturen der Selbstorganisation in Natur und Technik*. BoD Verlag. Norderstedt. 2010
- SEIFFERT, H.: *Einführung in die Wissenschaftstheorie*. Bd. 3: Handlungstheorie – Modallogik – Ethik – Systemtheorie. Beck Verlag. München. 1985
- SEILER, T.: *Rekursiver Autoassoziativer Speicher und Holographisch Reduzierte Repräsentation*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1996
- SEJNOWSKI, T.J.: Open Questions about Computation in Cerebral Cortex. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2: Psychological and Biological Models. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 372-89
- SENKOWSKI, D. / SCHNEIDER, T.R. / FOXE, J.J. / ENGEL, A.K.: Crossmodal Binding through Neural Coherence: Implications for Multisensory Processing. *Trends in Neurosciences*. Vol. 31. 2008. PP. 401-409
- SHADLEN, M.N.: Rate versus Temporal Coding Models. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 3. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 819-25
- SHADLEN, M.N. / NEWSOME, W.T.: Noise, Neural Codes and Cortical Organization. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 4. 1994. PP. 569-79
- SHADLEN, M.N. / NEWSOME, W.T.: The Variable Discharge of Cortical Neurons: Implications for Connectivity, Computation, and Information Coding. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 18. 1998. PP. 3870–96
- SHADLEN, M.N. / MOVSHON, J.A.: Synchrony Unbound: A Critical Evaluation of the Temporal Binding Hypothesis. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 67-77
- SHANAHAN, M.: The Frame Problem. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 1-4. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 144-50
- SHANNON, C.E.: A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*. Vol. 27. 1948. PP. 379-423, PP. 623-55
- SHANNON, C.E. / WEAVER, W.: *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press. Urbana. 1949 (dt.: *Mathematische Grundlagen der Informationstheorie*. Oldenbourg-Verlag. München, Wien. 1976)
- SHARKEY, N.E.: Connectionist Representation Techniques. *Artificial Intelligence Review*. Vol. 5. 1991. PP. 143-67
- SHASTRI, L.: Connections and the Computational Effectiveness of Reasoning. *Theoretical Linguistics*. Vol. 16. 1990. PP. 65-87
- SHASTRI, L.: Temporal Synchrony, Dynamic Bindings, and SHRUTI: A Representational but Non-Classical Model of Reflexive Reasoning. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 19. 1996. 331-37

- SHASTRI, L.: Advances in SHRUTI – A Neurally Motivated Model of Relational Knowledge Representation and Rapid Inference Using Temporal Synchrony. *Applied Intelligence*. Vol. 11. 1999. PP. 79-108
- SHASTRI, L.: Types and Quantifiers in SHRUTI – Connectionist Model of Rapid Reasoning and Relational Processing. In: S. WERMTER / R. SUN: *Hybrid Neural Systems*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 28-45
- SHASTRI, L.: Structured Connectionist Models. In: M.A. ARBIB (Ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1116-19
- SHASTRI, L.: Comparing the Neural Blackboard and the Temporal Synchrony-Based SHRUTI Architectures. *Commentary on: Fr. van der Velde / M. de Kamps: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition*. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 29. 2006. PP. 85-86
- SHASTRI, L.: SHRUTI: A Neurally Motivated Architecture for Rapid, Scalable Inference. In: B. HAMMER / P. HITZLER (Eds.): *Perspectives of Neural-Symbolic Integration*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2007. PP. 183-203
- SHASTRI, L. / AJJANAGADDE, V.: A Connectionist System for Rule Based Reasoning with Multi-Place Predicates and Variables. Technical Report MS-CIS-89-06. University of Pennsylvania. Department of Computer and Information Science. Philadelphia. 1989
- SHASTRI, L. / AJJANAGADDE, V.: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings. Technical Report MS-CIS-90-05. Department of Computer and Information Science. University of Pennsylvania. 1990
- SHASTRI, L. / AJJANAGADDE, V.: From Simple Associations to Systematic Reasoning: A Connectionist Representation of Rules, Variables and Dynamic Bindings Using Temporal Synchrony. 1990. University of Pennsylvania. Department of Computer and Information Science. Report No. MS-CIS-90-05 and in *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 16. 1993. PP. 417-51
- SHASTRI, L. / WENDELKEN, C.: Seeking Coherent Explanations – a Fusion of Structured Connectionism, Temporal Synchrony, and Evidential Reasoning. In: *Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Philadelphia, Pennsylvania. August, 2000. Erlbaum. Mahwah/NJ. 2000. PP. 453-58
- SHEA, N.: Content and its Vehicles in Connectionist Systems. *Mind and Language*. Vol. 22. 2007. PP. 246-69
- SIEGLER, R. / DeLOACHE, J. / EISENBERG, N.: *How Children Develop*. 3rd Ed. Worth Publishers. New York. 2003 (dt.: *Entwicklungspsychologie im Kindes- und Jugendalter*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. 2011)
- SIMMONS, W.K. / BARSALOU, L.W.: The Similarity-in-Topography Principle: Reconciling Theories of Conceptual Deficits. *Cognitive Neuropsychology*. Vol. 20. 2003. PP. 451-86
- SIMMONS, W.K. / HAMANN, St.B. / HARENSKI, C.L. / HU, X.P. / BARSALOU, L.W.: fMRI Evidence for Word Association and Situated Simulation in Conceptual Processing. *Journal of Physiology – Paris*. Vol. 102. 2008. PP. 106-19
- SIMON, H.A.: The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*. Vol. 106. 1962. PP. 467-82

- SIMON, H.A.: Production Systems. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 676-78
- SIMON, H.A.: Computational Models: Why Build Them? In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 621-23
- SIMON, H.A./ NEWELL, A.: Information Processing in Computer and Man. The American Scientist. Vol. 52. 1964. PP. 281-300 (dt.: Informationsverarbeitung in Computer und Mensch. In: W.C. ZIMMERLI / S. WOLF (Hrsg.): Künstliche Intelligenz. Philosophische Probleme. Philipp Reclam jun. Stuttgart. 1994. S. 112-45)
- SIMON, H.A. / KAPLAN, C.A.: Foundations of Cognitive Science. In: M.I. POSNER (Ed.): Foundations of Cognitive Science. MIT Press. Cambridge/MA. 1989. PP. 1-47
- SIMON, D. / HOLYOAK, K.J.: Structural Dynamics of Cognition: From Consistency Theories to Constraint Satisfaction. Personality and Social Psychology Review. Vol. 6. 2002. PP. 283-94
- SINGER, W.: Search for Coherence: A Basic Principle of Cortical Self-Organization. Concepts in Neuroscience. Vol. 1. 1990. PP. 1-26
- SINGER, W.: Synchronization of Cortical Activity and its Putative Role in Information Processing and Learning. Annual Review of Physiology. Vol. 55. 1993. PP. 349-74
- SINGER, W.: The Role of Synchrony in Neocortical Processing and Synaptic Plasticity. In: F. DOMANY / J.L. van HEMMEN / K. SCHULTEN (Eds.): Models of Neural Networks II. Temporal Aspects of Coding and Information Processing in Biological Systems. Ch. 4. Springer-Verlag. New York u.a. 1994. PP. 141-73
- SINGER, W.: Synchronization of Neuronal Responses as a Putative Binding Mechanism. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 960-64
- SINGER, W.: Development and Plasticity of Cortical Processing Architectures. Science. Vol. 270. 1995. PP. 758-64
- SINGER, W.: Neuronal Synchronization: A Solution to the Binding Problem. In: R.R. LLINÁS / P.S. CHURCHLAND (Eds.): The Mind-Brain Continuum. Sensory Processes. MIT Press. Cambridge/MA. 1996. PP. 100-30
- SINGER, W.: Bewußtsein, etwas „Neues, bis dahin Unerhörtes“. Berichte und Abhandlungen. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Bd. 4. Berlin. 1997. S. 175-90
- SINGER, W.: Binding by Neural Synchrony. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999. PP. 81-84
- SINGER, W.: Neuronal Synchrony: A Versatile Code for the Definition of Relations. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 49-65
- SINGER, W.: Das Bild im Kopf – ein Paradigmenwechsel. In: D. GANTEN u.a. (Hrsg.): Gene, Neurone, Qubits & Co. Unsere Welten der Information. Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte. Stuttgart, Heidelberg. 1999. S. 267-78

- SINGER, W.: Response Synchronization, a Neural Code for Relatedness. In: J.J. BOLHUIS (Ed.): Brain, Perception, Memory. Advances in Cognitive Neuroscience. Oxford University Press. Oxford. 2000. PP. 35-48
- SINGER, W.: Neuronal Synchrony as a Binding Mechanism. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Elsevier Science. Oxford. Vol. 15. 2001. PP. 10567-70
- SINGER, W.: Synchronization, Binding and Expectancy. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1136-43
- SINGER, W.: Der Beobachter im Gehirn. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2002. S. 144-70
- SINGER, W.: Hirnentwicklung oder die Suche nach Kohärenz. Determinanten der Hirnentwicklung. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2002. S. 120-43
- SINGER, W.: Neurobiologische Anmerkungen zum Konstruktivismus-Diskurs. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2002. S. 87-111
- SINGER, W.: Vom Gehirn zum Bewußtsein. In: W. SINGER: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2002. S. 60-76
- SINGER, W.: Unser Menschenbild im Spannungsfeld von Selbsterfahrung und neurobiologischer Fremdbeschreibung. KIZ Univ. Ulm. Ulm. 2003
- SINGER, W.: Das Gehirn – ein Orchester ohne Dirigent. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft. Bd. 2. 2005. S. 15-18
- SINGER, W.: Neural Synchrony and Feature Binding. In: L.R. SQUIRE (Ed.): Encyclopedia of Neuroscience. Vol. 6. Academic Press. Oxford. 2009. PP. 253-59
- SINGER, W. / GRAY, Ch.M. / ENGEL, A.K. / KÖNIG, P. / ARTOLA, A. / BRÖCHER, S.: Formation of Cortical Cell Assemblies. In: The Brain. Cold Spring Harbor. Cold Spring Harbor Laboratory Press. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. Vol. 55. 1990. PP. 939-52
- SINGER, W. / GRAY, Ch.M.: Visual Feature Integration and the Temporal Correlation Hypothesis. Annual Review of Neuroscience. Vol. 18. 1995. PP. 555-86
- SINGER, W. / ENGEL, A.K. / KREITER, A.K. / MUNK, M.H.J. / NEUENSCHWANDER, S. / ROELFSEMA, P.R. / KÖNIG, P.: Neuronal Assemblies: Necessity, Signature and Detectability. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 1. 1997. PP. 252-61
- SINGH, R. / ELIASMITH, Chr.: Higher-Dimensional Neurons Explain the Tuning and Dynamics of Working Memory Cells. Journal of Neuroscience. Vol. 26. 2006. PP. 3667-78
- SKARDA, C.A. / FREEMAN, W.J.: How Brains Make Chaos in order to Make Sense of the World. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 10. 1987. PP. 161-95
- SKIRKE, U.: Technologie und Selbstorganisation. Zum Problem eines zukunfts-fähigen Fortschrittsbegriffs. Dissertation. Universität Hamburg. 1997
- SMITH, E.E. / MEDIN, D.L.: Categories and Concepts. Harvard University Press. Cambridge/MA. 1981

- SMITH, L.B. / SAMUELSON, L.K.: Different is Good: Connectionism and Dynamic Systems Theory are Complementary Emergentist Approaches to Development. *Developmental Science*. Vol. 6. 2003. PP. 434-39
- SMITH CHURCHLAND, P.: *Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA. 1986
- SMITH CHURCHLAND, P.: *Brain-Wise: Studies in Neurophilosophy*. MIT Press. Cambridge/MA. 2002
- SMITH CHURCHLAND, P. / SEJNOWSKI, T.J.: *The Computational Brain*. MIT Press. Cambridge/MA. 1992 (dt.: *Grundlagen zur Neuroinformatik und Neurobiologie*. Vieweg Verlag. Wiesbaden. 1997)
- SMOLENSKY, P.: Schema Selection and Stochastic Inference in Modular Environments. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*. Washington/DC. August 22-26, 1983. Washington/DC. 1983. PP. 378-82
- SMOLENSKY, P.: Harmony Theory: Thermal Parallel Models in a Computational Context. In: P. SMOLENSKY / M.S. RILEY (Eds.): *Harmony Theory: Problem Solving, Parallel Cognitive Models, and Thermal Physics*. Technical Report 8404. Institute for Cognitive Science. University of California. San Diego. 1984. PP. 1-12
- SMOLENSKY, P.: The Mathematical Role of Self-Consistency in Parallel Computation. In: P. SMOLENSKY / M.S. RILEY (Eds.): *Harmony Theory: Problem Solving, Parallel Cognitive Models, and Thermal Physics*. Technical Report 8404. Institute for Cognitive Science. University of California. San Diego. 1984. PP. 1-6
- SMOLENSKY, P.: Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory. In: D.E. RUMELHART / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1: Foundations. MIT Press. A Bradford Book. Cambridge/MA. 1986. PP. 194-281
- SMOLENSKY, P.: Formal Modeling of Subsymbolic Processes: An Introduction to Harmony Theory. In: N.E. SHARKEY (Ed.): *Directions in the Science of Cognition*. Ellis Horwood. 1986. PP. 204-35
- SMOLENSKY, P.: On Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Technical Report CU-CS-355-87. Department of Computer Science. University of Colorado / Boulder. 1987. PP. 1-68
- SMOLENSKY, P.: A Method for Connectionist Variable Binding. In: Technical Report CU-CS-356-87. University of Colorado. Department of Computer Science. Boulder. 1987. PP. 1-10
- SMOLENSKY, P.: The Constituent Structure of Connectionist Mental States: A Reply to Fodor and Pylyshyn. *Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind*. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. 1988. PP. 137-61 (reprinted in: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 281-308)

- SMOLENSKY, P.: On the Proper Treatment of Connectionism. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 1-74
- SMOLENSKY, P.: Putting together Connectionism – again. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 11. Nr. 1. 1988. PP. 59-74
- SMOLENSKY, P.: Connectionist Modeling: Neural Computation / Mental Connections. In: L. NADEL et al. (Eds.): Neural Connections. Mental Computation. MIT/Bradford Press. Cambridge/MA. 1989 (reprinted in: J. HAUGELAND (Ed.): Mind Design II. Philosophy – Psychology – Artificial Intelligence. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1997. PP. 233-50)
- SMOLENSKY, P.: Connectionism and Constituent Structure. In: R. PFEIFER / Z. SCHRETER / Fr. FOGELMAN-SOULIÉ / L. STEELS (Eds.): Connectionism in Perspective. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, New York. 1989. PP. 3-24
- SMOLENSKY, P.: Tensor Produkt Variable Binding and the Representation of Symbolic Structures in Connectionist Systems. Artificial Intelligence. Vol. 46. 1990. PP. 159-216 (reprinted in: G.E. HINTON (Ed.): Connectionist Symbol Processing. MIT Press. Cambridge/MA. 1991)
- SMOLENSKY, P.: Connectionism, Constituency, and the Language of Thought. In: B. LOEWER / G. REY (Eds.): Meaning in Mind. Fodor and his Critics. Blackwell. Cambridge/MA, Oxford/UK. 1991. PP. 201-27 (reprinted in: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell. Oxford. 1995)
- SMOLENSKY, P.: Computational Models of Mind. In: S. GUTTENPLAN (Ed.): A Companion to the Philosophy of Mind. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/MA. 1994. PP. 176-85
- SMOLENSKY, P.: Reply: Constituent Structure and Explanation in an Integrated Connectionist / Symbolic Cognitive Architecture. In: C. MacDONALD / Gr. MacDONALD (Eds.): Connectionism: Debates on Psychological Explanation. Blackwell Publishers. Oxford/UK, Cambridge/ MA. Vol. 1. 1994. Vol. 2. 1995. PP. 223-90
- SMOLENSKY, P. / LEGENDRE, G. / MIYATA, Y. : Principles for an Integrated Connectionist / Symbolic Theory of Higher Cognition. Technical Report CU-CS-600-92, Department of Computer Science and 92-8, Institute of Cognitive Science. University of Colorado at Boulder. 1992. PP. 1-75
- SMOLENSKY, P. / LEGENDRE, G. / MIYATA, Y.: Integrating Connectionist and Symbolic Computation for the Theory of Language. In: V. HONAVAR / L. UHR (Eds.): Artificial Intelligence and Neural Networks: Steps toward Principled Integration. Academic Press. San Diego/CA, London. 1994. PP. 509-30
- SMOLENSKY, P. / LEGENDRE, G.: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 1: Cognitive Architecture. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006
- SMOLENSKY, P. / LEGENDRE, G.: The Harmonic Mind: From Neural Computation to Optimality-Theoretic Grammar. Vol. 2: Linguistic and Philosophical Implications. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2006
- SNOOKS, Gr.D.: A General Theory of Complex Living Systems: Exploring the Demand Side of Dynamics. Complexity. Vol. 13. 2008. PP. 12-20

- SNYMAN, J.A.: Practical Mathematical Optimization. An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms. Springer Publishing. 2005
- SOBEL, C.P.: The Cognitive Sciences. An Interdisciplinary Approach. Mayfield. Mountain View/CA. 2001
- SOFTKY, W.R.: Simple Codes versus Efficient Codes. Current Opinion in Neurobiology. Vol. 5. 1995. PP. 239-47
- SOMERS, D. / KOPELL, N.: Rapid Synchronization through Fast Treshold Modulation. Biological Cybernetics. Vol. 68. 1993. PP. 393-407
- SOMERS, D. / KOPELL, N.: Waves and Synchrony in Networks of Oscillators of Relaxation and Non-Relaxation Type. Physica D: Nonlinear Phenomena. Vol. 89. 1995. PP. 169-83
- SOMPOLINSKY, H.: Statistical Mechanics of Neural Networks. Physics Today. Vol. 41. Iss. 12. 1988. PP. 70-80
- SOUGNÉ, J.P.: Connectionism and the Problem of Multiple Instantiation. Trends in Cognitive Sciences. Vol. 2. 1998. PP. 183-89
- SOUGNÉ, J.P.: INFERNET: A Neurocomputational Model of Binding and Inference. Doctoral Thesis. Université de Liège. 1999
- SOUGNÉ, J.P.: Binding and Multiple Instantiation in Distributed Networks of Spiking Nodes. Connection Science. Vol. 13. 2001. PP. 99-126
- SOUGNÉ, J.P.: Binding Problem. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 374-82
- SPECK, J. (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Gegenwart I: Frege · Carnap · Wittgenstein · Popper · Russell · Whitehead. Mit einer Einführung in „Die Sprache der Logik“. 2. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1979
- SPECK, J. (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Gegenwart III: Moore · Goodman · Quine · Ryle · Strawson · Austin. 2. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1984
- SPECK, J. (Hrsg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit VI: Tarski · Reichenbach · Kraft · Gödel · Neurath. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 1992
- SPENCER, J.P. / SCHÖNER, Gr.: Bridging the Representational Gap in the Dynamic Systems Approach to Development. Development Science. Vol. 6. 2003. PP. 392-412
- SPENCER, J.P. / DINEVA, E. / SCHÖNER, Gr.: Moving toward a Unified Theory while Valuing the Importance of the Initial Conditions. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 354-72
- SPENCER, J.P. / PERONE, S. / JOHNSON, J.S.: The Dynamic Field Theory and Embodied Cognitive Dynamics. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 86-118

- SPENCER, J.P. / THOMAS, M.S.C. / McCLELLAND, J.L. (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009
- SPENCER-BROWN, G.: *The Laws of Form*. Allen and Unwin. London. 1969
- SPITZER, M.: *Geist im Netz. Modelle für Lernen, Denken und Handeln*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin. 2000
- SPORNS, O.: *Selectionist and Instructionist Ideas in Neuroscience*. In: O. SPORNS / G. TONONI (Eds.): *Selectionism and the Brain*. *International Review of Neurobiology*. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994. PP. 4-26
- SPORNS, O.: *Networks of the Brain*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2011
- SPORNS, O. / TONONI, G. (Eds.): *Selectionism and the Brain*. *International Review of Neurobiology*. Vol. 37. Academic Press. San Diego. 1994
- SQUIRE, L. et al. (Eds.): *Fundamental Neuroscience*. 3rd Ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam, Heidelberg. 2009
- STADLER, Fr.: *Studien zum Wiener Kreis. Ursprung, Entwicklung und Wirkung des Logischen Empirismus im Kontext*. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1997
- STEGMÜLLER, W.: *Personelle und Statistische Wahrscheinlichkeit. Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Teil IV. Erster Halbband: Personelle Wahrscheinlichkeit und Rationale Entscheidung*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1973
- STEGMÜLLER, W.: *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band I*. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987
- STEGMÜLLER, W.: *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Eine kritische Einführung. Band III*. 8. Aufl. Alfred Kröner Verlag. Stuttgart. 1987
- STEIN, R.B. / GOSSSEN, R.R. / JONES, K.E.: *Neuronal Variability: Noise or Part of the Signal?* *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 6. 2005. PP. 389-97
- STEINBACHER, K.: *System/Systemtheorie*. In: H.J. SANDKÜHLER: *Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften*. Bd. 4. Felix Meiner Verlag. Hamburg. 1990. S. 500
- STENIUS, E.: *Wittgenstein's Tractatus. A Critical Exposition of its Main Lines of Thought*. Blackwell. Oxford. 1960 (dt.: *Wittgensteins Traktat. Eine kritische Darlegung seiner Hauptgedanken*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1969)
- STEPHAN, A.: *Emergenz. Von der Unvorhersagbarkeit zur Selbstorganisation*. Dresden Universitätsverlag. Dresden. 1999
- STEPHAN, A.: *Zur Rolle des Emergenzbegriffs in der Philosophie des Geistes und in der Kognitionswissenschaft*. In: D. STURMA (Hrsg.): *Philosophie und Neurowissenschaften*. Suhrkamp Verlag. Frankfurt/M. 2006. S. 146-66
- STERNBERG, R.J.: *Cognitive Psychology*. 3th Ed. Thomson/ Wadsworth. Belmont/ CA. 2003
- STEWART, T.C. / ELIASMITH, Chr.: *Building Production Systems with Realistic Spiking Neurons*. In: B.C. LOVE / K. McRAE / V.M. SLOUTSKY (Eds.): *Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Cognitive Science Society. Austin/TX. 2008. PP. 1759-64

- STEWART, T.C. / BEKOLAY, T. / ELIASMITH, Chr.: Neural Representations of Compositional Structures. Representing and Manipulating Vector Spaces with Spiking Neurons. *Connection Science*. Vol. 22. 2011. PP. 145-53
- STEWART, T.C. / ELIASMITH, Chr.: Compositionality and Biologically Plausible Models. In: W. HINZEN / E. MACHERY / M. WERNING (Eds.): *The Oxford Handbook of Compositionality*. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 596-615
- STILLINGS, N.A. / WEISLER, S.E. / CHASE, C.H. / FEINSTEIN, M.H. / GARFIELD, J.L. / RISSLAND, E.L.: *Cognitive Science: An Introduction*. 2nd Ed. The MIT Press. Cambridge/MA. 1995
- STOICA-KLÜVER, Chr. / KLÜVER, J. / SCHMIDT, J.: *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren. Komplexe adaptive Verfahren – Modellbildungen und -theorie – neuronale Netze – Soft Computing und verwandte Techniken*. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2009
- STONIER, T.: *Information and Meaning: An Evolutionary Perspective*. Springer-Verlag. London u.a. 1997
- STOPFER, M. / BHAGAVAN, S. / SMITH, B. / LAURENT, G.: Impaired Odour Discrimination on Desynchronization of Odour-Encoding Neural Assemblies. *Nature*. Vol. 390. 1997. PP. 70-74
- STREMMINGER, G.: *David Hume. Sein Leben und sein Werk* 2. Aufl. Schöningh. Paderborn. 1994
- STROGATZ, St.H.: *Nonlinear Dynamics and Chaos. With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Westview Press. Cambridge 2000
- STROGATZ, St.H.: Exploring Complex Networks. *Nature*. Vol. 410. 2001. PP. 268-76
- STROHNER, H.: *Kognitive Systeme. Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft*. Westdeutscher Verlag. Opladen. 1995
- STROUD, B.: *Hume*. Routledge & Kegan. London u.a. 1977
- STRUBE, G.: *Neokonnektionismus: Eine neue Basis für die Theorie und Modellierung menschlicher Kognition*. *Psychologische Rundschau*. Bd. 41. 1990. S. 129-43
- STRUBE, G.: *Kognition*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verlag. Stuttgart. 1996. S. 303-17
- STRUBE, G.: *Kognitionswissenschaft*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verlag. Stuttgart. 1996. S. 317-19
- STRUBE, G.: *Symbolverarbeitung*. In: G. STRUBE (Hrsg.): *Wörterbuch der Kognitionswissenschaft*. Klett-Cotta Verlag. Stuttgart. 1996. S. 708
- STRUBE, G. / HABEL, Chr. / KONIECZNY, L. / HEMFORTH, B.: *Kognition*. In: G. GÖRZ et al. (Hrsg.): *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. 3. Aufl. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 2000. S. 19-71
- STRUNK, G.: *Die Selbstorganisationshypothese der Psychotherapie*. *Systeme. Interdisziplinäre Zeitschrift für systemtheoretisch orientierte Forschung und Praxis in den Humanwissenschaften*. Bd. 12. H. 2. 1998. S. 3-21
- STRUNK, G.: *Die Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme – Grundsätzliches – Nutzen – Therapie*. *Systeme. Interdisziplinäre Zeitschrift für systemtheoretisch orientierte Forschung und Praxis in den Humanwissenschaften*. Bd. 14. H. 2. 2000. S. 185-19

- STRUNK, G. / SCHIEPEK, G.: Systemische Psychologie. Eine Einführung in die komplexen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Elsevier GmbH. Spektrum Akademischer Verlag. München. 2006
- SULIS, W.: Fundamental Concepts of Collective Intelligence. Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences. Vol. 1. 1997. PP. 35-53
- SUN, R.: A Discrete Neural Network Model for Conceptual Representation and Reasoning. Program of the 11th Annual Conference of the Cognitive Science Society. 16-19 August 1989. Ann Arbor, Michigan. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989. PP. 916-23
- SUN, R.: On Variable Binding in Connectionist Networks. Connection Science. Vol. 4. 1992. PP. 93-124
- SUN, R.: An Introduction: On Symbolic Processing in Neural Networks. In: R. SUN / L.A. BOOKMAN (Eds.): Computational Architectures Integrating Symbolic and Connectionist Processing. A Perspective on the State of the Art. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1995. PP. 1-18
- SUN, R.: Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning. John Wiley & Sons. New York. 1995
- SUN, R.: CONSYDERR: A Two-Level Hybrid Architecture for Structuring Knowledge for Commonsense Reasoning. In: R. SUN / L.A. BOOKMAN (Eds.): Computational Architectures Integrating Symbolic and Connectionist Processing. A Perspective on the State of the Art. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1995. PP. 247-81
- SUN, R.: Schemas, Logic and Neural Assemblies. Applied Intelligence. Vol. 5. 1995. PP. 83-102
- SUN, R.: Robust Reasoning: Integrating Rule-Based and Similarity-Based Reasoning. Artificial Intelligence. Vol. 75. 1995. PP. 241-96
- SUN, R.: An Introduction to Hybrid Connectionist-Symbolic Models. In: R. SUN / Fr. ALEXANDRE (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997. PP. 1-10
- SUN, R.: Artificial Intelligence. In: W. BECHTEL / G. GRAHAM (Eds.): A Companion to Cognitive Science. Blackwell Publisher. Malden/MA., Oxford/UK. 1998. PP. 341-51
- SUN, R.: Artificial Intelligence. Connectionist and Symbolic Approaches. In: N.J. SMELSER / P.B. BALTES (Eds.): International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Pergamon/Elsevier Science. Oxford. 2001. PP. 783-89
- SUN, R.: Connectionist Implementationalism and Hybrid Systems. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 1. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 697-703
- SUN, R. / ALEXANDRE, Fr. (Eds.): Connectionist-Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 1997
- SUTTON, R.S. / BARTO, A.G.: Reinforcement Learning. An Introduction. A Bradford Book, The MIT Press. London. 1998
- SZABÓ, Z.G.: Compositionality. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (February 14, 2007 Edition).
From: <http://plato.stanford.edu/entries/compositionality/>

- TABOR, Wh.: Dynamical Insight into Structure in Connectionist Models. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): *Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered*. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 165-81
- TACCA, M.C.: *Seeing Objects: The Structure of Visual Representation*. Mentis. Paderborn. 2010
- TALLON, C. / BERTRAND, O. / BOUCHET, P. / PERNIER, J.: Gamma-Range Activity Evoked by Coherent Visual Stimuli in Humans. *European Journal of Neuroscience*. Vol. 7. 1995. PP. 1285-91
- TALLON-BAUDRY, C.: Oscillatory Synchrony as a Signature for the Unity of Visual Experience in Humans. In: A. CLEEREMANS (Ed.): *The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation*. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003. PP. 153-67
- TALLON-BAUDRY, C. / BERTRAND, O. / DELPUECH, C. / PERNIER, J.: Stimulus Specificity of Phase-Locked and Non-Phased-Locked 40 Hz Visual Responses in Human. *Journal of Neuroscience*. Vol. 16. 1996. PP. 4240-49
- TALLON-BAUDRY, C. / BERTRAND, O. / DELPUECH, C. / PERNIER, J.: Oscillatory Gamma-Band (30-70 Hz) Activity Induced by a Visual Search Task in Humans. *Journal of Neuroscience*. Vol. 17. 1997. PP. 722-34
- TALLON-BAUDRY, C. / BERTRAND, O. / PERONNET, S. / PERNIER, J.: Induced Gamma-Band Activity During the Delay of a Visual Short-Term Memory Task in Humans. *Journal of Neuroscience*. Vol. 18. 1998. PP. 4244-54
- TALLON-BAUDRY, C. / KREITER, A. / BERTRAND, O.: Sustained and Transient Oscillatory Responses in the Gamma and Beta Bands in a Visual Short-Term Memory Task in Humans. *Visual Neuroscience*. Vol. 16. 1999. PP. 449-59
- TANAKA, T. / WEITZENFELD, A.: Adaptive Resonance Theory. In: A. WEITZENFELD / M.A. ARBIB / A. ALEXANDER: *The Neural Simulation Language: A System for Brain Modeling*. Bradford Books. MIT Press. 2002. PP. 157-69
- TARSKI, A. (St.R. GIVANT et al. (Eds.)): *Collected Papers*. Birkhäuser. Basel u.a. (1921-79) 1986
- TARSKI, A.: Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen. *Studia Philosophica*. Vol. 1. 1936. S. 261-405 (wiederabgedruckt in: K. BERKA / L. KREISER (Hrsg.): *Logik-Texte. Kommentierte Auswahl zur Geschichte der modernen Logik*. Akademie-Verlag. Berlin. 1983. S. 445-546)
- TAYLOR, J.G.: Neural Networks for Consciousness. In: Sh.-I. AMARI / N. KASABOV (Eds.): *Brain-Like Computing and Intelligent Information Systems*. 4th International Conference on Neural Information Processing. New Zealand. Springer-Verlag. Singapore. 1997. PP. 461-84
- TESAR, B.B. / SMOLENSKY, P.: Synchronous Firing Variable Binding is a Tensor Product Representation with Temporal Role Vectors. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 870-75
- TESCHL, G.: *Ordinary Differential Equations and Dynamical Systems*. American Mathematical Society. Providence/Rhode Island. 2011
From: <http://www.mat.univie.ac.at/~gerald/ftp/book-ode/ode.pdf>

- THAGARD, P.: Explanatory Coherence. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 12. 1989. PP. 435-67
- THAGARD, P.: Coherence in Thought and Action. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2000
- THAGARD, P.: Mind: An Introduction to Cognitive Science. 2nd Ed. MIT Press. Cambridge/MA, London. 2005
- THAGARD, P.: Cognitive Science. In: E.N. ZALTA (Ed.): The Stanford Encyclopedia of Philosophy (June 9, 2010 Edition).
From: <http://plato.stanford.edu/entries/cognitive-science/>
- THAGARD, P. / MILLGRAM, E.: Inference to the Best Plan: A Coherence Theory of Decision. In: A. RAM / D.B. LEAKE (Eds.): Goal-Driven Learning. MIT Press. Cambridge/MA. 1995. PP. 439-54
- THAGARD, P. / VERBEURGT, K.: Coherence as Constraint Satisfaction. Cognitive Science. Vol. 22. 1998. PP. 1-24
- THELEN, E.: Time-Scale Dynamics and the Development of an Embodied Cognition. In: R.F. PORT / Th.J. van GELDER (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 69-100
- THELEN, E. / SMITH, L.B.: A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action. MIT Press. Cambridge/MA. 1993
- THELEN, E. / BATES, E.: Connectionism and Dynamic Systems: Are they Really Different? Development Science. Vol. 6. 2003. PP. 378-91
- THELEN, E. / SMITH, L.B.: Dynamic Systems Theories. In: W: DAMON / R.M. LERNER: Handbook of Child Psychology. Vol. 1: Theoretical Models of Human Development. 6th Ed. Chap. 6. 2006. PP. 258-312
- THEUNISSEN, Fr. / MILLER, J.P.: Temporal Encoding in Nervous Systems: A Rigorous Definition. Journal of Computational Neuroscience. Vol. 2. 1995. PP. 149-62
- THIELE, A. / STONER, G.: Neuronal Synchrony does not Correlate with Motion Coherence in Cortical Area MT. Nature. Vol. 421(6921). 2003. PP. 366-70
- THOM, R.: Structural Stability and Morphogenesis. Benjamin. Reading/MA. 1975
- THOM, R.: Semiophysics. Addison-Wesley. Redwood City/CA. 1989
- THOMAS, M.S.C. / McCLELLAND, J.L.: Connectionist Models of Cognition. In: R. SUN (Ed.): Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modelling. Cambridge University. Cambridge. 2008. PP. 23-58
- THOMAS, M.S.C. / McCLELLAND, J.L. / RICHARDSON, F.M. / SCHAPIRO, A.C. / BAUGHMAN, Fr.D.: Dynamic and Connectionist Approaches to Development: Toward a Future of Mutually Beneficial Coevolution. In: J.P. SPENCER / M.S.C. THOMAS / J.L. McCLELLAND (Eds.): Toward a Unified Theory of Development: Connectionism and Dynamic Systems Theory Re-Considered. Oxford Univ. Press. 2009. PP. 337-53
- THOMPSON, E. / VARELA, Fr.J.: Radical Embodiment: Neural Dynamics and Consciousness. Trends in Cognitive Science. Vol. 5. 2001. PP. 418-25
- THORPE, S.J.: Localized Versus Distributed Representations. In: A. ARBIB: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 643-45

- TIENSON, J.: An Introduction to Connectionism. *Southern Journal of Philosophy*. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. 1988. PP. 1-16
- TIENSON, J.: Introduction. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): *Connectionism and the Philosophy of Mind*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 1-29
- TIFFANY, E.: Semantics San Diego Style. *Journal of Philosophy*. Vol. 96. 1999. PP. 416-29
- TONONI, G.: An Information Integration Theory of Consciousness. *BMC Neuroscience*. Vol. 5. 2004. PP. 1-22
From: doi:10.1186/1471-2202-5-42
- TONONI, G.: Consciousness and the Brain: Theoretical Aspects. In: G. ADELMAN / B. SMITH (Eds.): *Encyclopedia of Neuroscience*. 3rd Ed. Elsevier. Amsterdam, Oxford u.a. 2004. PP. 1-16
- TONONI, G. / SPORNS, O. / EDELMAN, G.M.: Reentry and the Program of Integrating Multiple Cortical Areas: Simulation of Dynamic Integration in the Visual System. *Cerebral Cortex*. Vol. 2. 1992. PP. 310-35
- TONONI, G. / SPORNS, O. / EDELMAN, G.M.: A Measure for Brain Complexity: Relating Functional Segregation and Integration in the Nervous System. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 91. 1994. PP. 5033-37
- TONONI, G. / McINTOSH, A.R. / RUSSELL, D.P. / EDELMAN, G.M.: Functional Clustering: Identifying Strongly Interactive Brain Regions in Neuroimaging Data. *NeuroImage*. Vol. 7. 1998. PP. 133-49
- TONONI, G. / EDELMAN, G.M.: Consciousness and Complexity. *Science*. Vol. 282. 1998. PP. 1846-51
- TONONI, G. / EDELMAN, G.M.: Consciousness and the Integration of Information in the Brain. In: H.H. JASPER / L. DESCARRIES / V.F. CASTELLUCCI / S. ROS-SIGNOL (Eds.): *Consciousness. At the Frontiers of Neuroscience*. Plenum Press. New York. 1998. PP. 245-79
- TONONI, G. / SPORNS, O.: Measuring Information Integration. *BMC Neuroscience*. Vol. 4. 2003. PP. 1-20
From: doi: 10.1186/1471-2202-4-31
- TONONI, G. / KOCH, Chr.: The Neural Correlates of Consciousness: An Update. *Annals New York Academy of Science*. Vol. 1124. 2008. PP. 239-61
- TOURETZKY, D.S.: Connectionist and Symbolic Representations. In: A. ARBIB: *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 260-63
- TOURETZKY, D.S. / HINTON, G.E.: A Distributed Connectionist Production System. *Cognitive Science*. Vol. 12. PP. 423-66
- TOWNSEND, J.T. / TORII, K.: Information Processing. In: L. NADEL (Ed.): *Encyclopedia of Cognitive Science*. Vol. 2. Natur Publishing Group. London, New York and Tokyo. 2003. PP. 544-50
- TRAUTNER, H.M.: *Lehrbuch der Entwicklungspsychologie*. Bd. 2: Theorien und Befunde. 2. Aufl. Hogrefe. Göttingen u.a. 1991

- TREISMAN, A.: Focused Attention in the Perception and Retrieval of Multidimensional Stimuli. *Perception and Psychophysics*. Vol. 22. 1977. PP. 1-11
- TREISMAN, A.: Features and Objects in Visual Processing. *Scientific American*. Vol. 254. 1986. PP. 114-25
- TREISMAN, A.: Features and Objects. The Fourteenth Bartlett Memorial Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Vol. 40A. 1988. PP. 201-37
- TREISMAN, A.: The Perception of Features and Objects. In: A. BADDELEY / L. WEISKRANTZ: *Attention: Selection, Awareness & Control. A Tribute to Donald Broadbent*. Clarendon Press. Oxford. 1993. PP. 5-35
- TREISMAN, A.: The Binding Problem. *Current Opinion in Neurobiology*. Vol. 6. 1996. PP. 171-78
- TREISMAN, A.: Feature Binding, Attention and Object Perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences*. Vol. 353. 1998. PP. 1295-1306
- TREISMAN, A.: Solutions to the Binding Problem: Progress through Controversy and Convergence. *Neuron*. Vol. 24. 1999. PP. 105-10
- TREISMAN, A.M. / GELADE, G.: A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*. Vol. 12. 1980. PP. 97-136
- TREISMAN, A. / SCHMIDT, H.: Illusory Conjunctions in the Perception of Objects. *Cognitive Psychology*. Vol. 14. 1982. PP. 107-41
- TREISMAN, A. / SATO, S.: Conjunction Search Revisited. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*. Vol. 16. 1990. PP. 459-76
- TRIESCH, J. / MALSBURG, Chr. von der: Democratic Integration: Self-Organized Integration of Adaptive Cues. *Neural Computation*. Vol. 13. 2001. PP. 2049-74
- TROY, W.C.: Wave Phenomena in Neuronal Networks. In: N. AKHMEDIEV / A. ANKIEWICZ (Eds.): *Dissipative Solitons. From Optics to Biology and Medicine*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2008. PP. 431-52
- TSCHACHER, W.: Zeitreihenanalyse in der systemischen Forschung. In: M. OCHS / J. SCHWEITZER (Hrsg.): *Handbuch Forschung für Systemiker*. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen. 2012. S. 299-314
- TSCHACHER, W. / SCHIEPEK, G. / BRUNNER, E.J.: *Self-Organization and Clinical Psychology. Empirical Approaches to Synergetics in Psychology*. Springer. Berlin u.a. 1992
- TSCHACHER, W. / SCHIEPEK, G.: Eine methodenorientierte Einführung in die synergetische Psychologie. G. SCHIEPEK / W. TSCHACHER (Hrsg.): *Selbstorganisation in Psychologie und Psychiatrie*. Vieweg Verlag. Braunschweig. 1997. S. 3-31
- TSCHACHER, W. / J.-P. DAUWALDER / H. HAKEN: Self-Organizing Systems Show Apparent Intentionality. In: W. TSCHACHER / J.-P. DAUWALDER (Eds.): *The Dynamical Systems Approach to Cognition*. World Scientific. Singapore. 2003. PP. 183-200
- TS'O, D.Y. / GILBERT, C.D.: The Organization of Chromatic and Spatial Interactions in the Primate Striate Cortex. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 8. 1988. PP. 1712-27

- TSUDA, I.: Toward an Interpretation of Dynamic Neural Activity in Terms of Chaotic Dynamical Systems. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 24. 2001. PP. 793-847
- TSUNG, F.-Sh. / COTTRELL, G.W.: Hopf Bifurcation and Hopf Hopping in Recurrent Nets. IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco/CA. Vol. 1. 1993. PP. 39-45
- TSUNG, F.-Sh. / COTTRELL, G.W.: Phase Space Learning for Recurrent Networks. Technical Report CS93-285. Dept. of Computer Science & Engineering. University of California. San Diego. 1993
- TUCKER, D.M.: Motivated Anatomy: A Core-and-Shell Model of Corticolimbic Architecture. In: G. GAINOTTI (Ed.): Handbook of Neuropsychology. 2nd Ed. Vol. 5: Emotional Behavior and its Disorders. Elsevier Science. Amsterdam. 2001. PP. 125-60
- TURING, A.M.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. Proceedings of the London Mathematical Society. Vol. 2. No. 42. 1936. PP. 230-65
- TURING, A.M.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem: A Correction. Proceedings of the London Mathematical Society. Vol. 2. No. 43. 1938. PP. 544-46
- TYE, M.: Representation in Pictorialism and Connectionism. In: T. HORGAN / J. TIENSON: Spindel Conference 1987: Connectionism and the Philosophy of Mind. The Southern Journal of Philosophy. Special Issue on Connectionism and the Foundations of Cognitive Science. Vol. 26. Supplement. PP. 163-83
- UHLHAAS, P. / PIPA, B. / LIMA, L. / MELLONI, S. / NEUENSCHWANDER, S. / NIKOLIC, D. / SINGER, W.: Neural Synchrony in Cortical Networks: History, Concept and Current Status. Frontiers in Integrative Neuroscience. Vol. 3. 2009. PP. 1-19
- UNBEHAUEN, R.: Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. 8. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. (1969, 1997) 2002
- UNBEHAUEN, R.: Systemtheorie 2: Mehrdimensionale, adaptive und nichtlineare Systeme. 7. Aufl. Oldenbourg. München, Wien. (1969) 1998
- VADÉN, T.: Subsymbolic Connectionism: Representational Vehicles and Contents. In: L.F. NIKLASSON / M.B. BODEN (Eds.): Connectionism in a Broad Perspective: Selected Papers from the Swedish Conference on Connectionism -1992. Ellis Horwood. New York. 1994. PP. 43-47
- VADÉN, T.: The Symbolic-Subsymbolic Relation: From Limitivism to Correspondence. In: L.F. NIKLASSON / M. BODEN: Current Trends in Connectionism: Proceedings of the 1995 Swedish Conference on Connectionism. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1995. PP. 331-44
- VADÉN, T.: The Symbolic and Subsymbolic Theories in Cognitive Science. Tampereen Yliopisto. Tampere/Finnland. 1996
- van der POL, B.: On Relaxation Oscillation. Philosophical Magazine. Vol. 2 1926. PP. 978-92

- van der VELDE, Fr.: Neural Architectures of Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 265-81
- van der VELDE, Fr. / M. de KAMPS: Synchrony in the Eye of the Beholder: An Analysis of the Role of Neural Synchronization in Cognitive Processes. Brain and Mind. Vol. 3. 2002. PP. 291-312
- van der VELDE, Fr. / M. de KAMPS: A Neural Blackboard Architecture of Sentence Structure. Technical Report. Unpublished. 2003. PP. 1-40
- van der VELDE, Fr. / M. de KAMPS: Neural Blackboard Architectures of Combinatorial Structures in Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 37-70
- van der VELDE, Fr. / M. de KAMPS: From Neural Dynamics to Combinatorial Structures. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 29. 2006. PP. 88-108
- van GELDER, T.: Distributed Representation. PhD Thesis. University of Pittsburgh. 1989
- van GELDER, T.: Compositionality and the Explanation of Cognitive Processes. In: G. OLSON / E. SMITH (Eds.): Proceedings of the Eleventh Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1989
- van GELDER, T.: Compositionality: A Connectionist Variation on a Classical Theme. Cognitive Science. Vol. 14. 1990. PP. 355-84
- van GELDER, T.: Why Distributed Representation is Inherently Non-Symbolic. In: G. DORFFNER (Hrsg.): Konnektionismus in Artificial Intelligence und Kognitionforschung. 1990. Springer-Verlag. Berlin u.a. PP. 58-66
- van GELDER, T.: What is the "D" in "PDP"? A Survey of the Concept of Distribution. In: W. RAMSEY / St.P. STICH / D.E. RUMELHART (Eds.): Philosophy and Connectionist Theory. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ u.a. 1991. PP. 33-59
- van GELDER, T.: Classical Questions, Radical Answers: Connectionism and the Structure of Mental Representations. In: T. HORGAN / J. TIENSON (Eds.): Connectionism and the Philosophy of Mind. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. 1991. PP. 355-81
- van GELDER, T.: Defining "Distributed Representation". Connection Science. Special Issue on Philosophical Issues in Connectionist Modeling. Vol. 4. 1992. PP. 175-91.
- van GELDER, T.: Making Conceptual Space. In: St. DAVIS (Ed.): Connectionism: Theory and Practice. Oxford University Press. New York, Oxford. 1992. PP. 179-94
- van GELDER, T.: Compositionality and Dynamics in Neural Networks Representations. Sémiotiques. Vol. 6. 1994. PP. 49-67
- van GELDER, T.: Modeling, Connectionist and Otherwise. In: L.F. NIKLASSON / M. BODEN: Current Trends in Connectionism: Proceedings of the 1995 Swedish Conference on Connectionism. Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1995. PP. 217-35
- van GELDER, T.: Dynamics and Cognition. In: J. HAUGELAND (Ed.): Mind Design II. Philosophy – Psychology – Artificial Intelligence. Revised and Enlarged Edition. A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1997. PP. 421-50

- van GELDER, T.: Author's Response: Disentangling Dynamics, Computation and Cognition. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. PP. 40-47
- van GELDER, T.: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science. Behavioral and Brain Sciences. Vol. 21. 1998. PP. 615-28
- van GELDER, T.: Defending the Dynamical Hypothesis. In: W. TSCHACHER / J.-P. DAUWALDER (Eds.): Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents: Nonlinear Systems Approaches to Cognitive Psychology and Cognitive Science. World Scientific. Singapore. 1999. PP. 13-28
- van GELDER, T.: Distributed vs. Local Representation. In: R.A. WILSON / Fr.C. KEIL (Eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press. Cambridge/MA. London. 1999. PP. 236-38
- van GELDER, T.: Revisiting the Dynamical Hypothesis. Preprint No. 2/99. University of Melbourne. Department of Philosophy. 1999. PP. 1-21
- van GELDER, T. / NIKLASSON, L.: On being Systematically Connectionist. Mind and Language. Vol. 9. 1994. PP. 288-302
- van GELDER, T. / NIKLASSON, L.: Classicalism and Cognitive Architecture. In: A. RAM / K. EISELT (Eds.): Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. August 13 to 16. 1994. Georgia Institute of Technology. Lawrence Erlbaum. Hillsdale/NJ. 1994. PP. 905-909
- van GELDER, T. / PORT, R.F.: Beyond Symbolic: Toward a Kama-Sutra of Compositionality. In: V. HONAVAR / L. UHR (Eds.): Artificial Intelligence and Neural Networks: Steps toward Principled Integration. Academic Press. San Diego/CA, London. 1994. PP. 107-25
- van GELDER, T. / PORT, R.F.: It's About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition. In: PORT, R.F. / van GELDER, Th.J. (Eds.): Mind as Motion. Explorations in the Dynamics of Cognition. A Bradford Book. MIT Press. Cambridge/MA, London. 1995. PP. 1-43
- van HULLE, M.M.: Faithful Representations and Topographic Maps – From Distortion- to Information-Based Self-Organization. John Wiley. New York. 2000
- van RULLEN, R. / THORPE, S.J.: Rate Coding Versus Temporal Order Coding: What the Retinal Ganglion Cells Tell the Visual Cortex. Neural Computation. Vol. 13. 2001. PP. 1255-83
- van RULLEN, R. / GUYONNEAU, R. / THORPE, S.J.: Spike Times Make Sense. Trends in Neurosciences. Vol. 28. 2005. PP. 1-4
- VARELA, Fr.: A Calculus for Self-Reference. International Journal of General Systems. Vol. 2. 1975. PP. 5-24
- VARELA, Fr.: Principles of Biological Autonomy. North Holland. New York, Oxford. 1979
- VARELA, Fr.: Kognitionswissenschaft, Kognitionstechnik. Eine Skizze aktueller Perspektiven. 3. Aufl. Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main. 1993
- VARELA, Fr.J.: Resonant Cell Assemblies: A New Approach to Cognitive Functions and Neuronal Synchrony. Biological Research. Vol. 28. 1995. PP. 81-95
- VARELA, Fr. J.: The Specious Present: A New Neurophenomenology of Time Consciousness. In: J. PETITOT / Fr.J. VARELA / J.-M. ROY / B. PACHOUD (Eds.): Naturalizing Phenomenology. Stanford University Press. Stanford/CA. 1999. PP. 266-314

- VARELA, Fr.J.: Neuronal Synchrony and Cognitive Functions. In: B. FELTZ / M. CROMMELINCK / Ph. GOUJON (Eds.): Self-Organization and Emergence in Life Sciences. Springer-Verlag, Dordrecht. 2006. PP. 95-108
- VARELA, Fr.J. / MATURANA, H.R. / URIBE, R.: Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model. Biosystems. Vol. 5. 1974. PP. 187-96
- VARELA, Fr.J. / THOMPSON, E. / ROSCH, E.: The Embodied Mind – Cognitive Science and Human Experience. The MIT Press. Cambridge/MA. 1992
- VARELA, Fr.J. / LACHAUX, J.P. / RODRIGUEZ, E. / MARTINERIE, J.: The Brainweb: Phase Synchronization and Large-Scale Integration. Nature Neuroscience. Vol. 2. 2001. PP. 229-37
- VARELA, Fr.J. / THOMPSON, E.: Neural Synchrony and the Unity of Mind: A Neuropsychological Perspective. In: A. CLEEREMANS (Ed.): The Unity of Consciousness: Binding, Integration, and Dissociation. Oxford Univ. Press. Oxford. 2003. PP. 266-87
- WATER, H.: Einführung in die Sprachwissenschaft. 4. Aufl. Wilhelm Fink Verlag. München. 2002
- VEC, M. / HUETT, M.-Th. / FREUND, A.M. (Hrsg.): Selbstorganisation. Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Böhlau. Köln u.a. 2006
- VOGELEY, K. / BARTELS, A.: Repräsentation in den Neurowissenschaften. In: H.J. SANDKÜHLER (Hrsg.): Theorien und Begriffe der Repräsentation. Schriftenreihe der von der Volkswagen Stiftung geförderten Forschungsgruppe Repräsentation. Bd. 1. Bremen. 2006. S. 99-113
- WACHTER, A. / HOEBER, H.: Repetitorium Theoretische Physik. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998
- WAGNER, G.P.: On the Necessity of a Systems Theory of Evolution and its Population Biologic Foundations: Comments on Dr. Regelman's Article. Acta Biotheoretica. Vol. 32. 1983. PP. 223-26
- WAGNER, G.P.: Über die populationsgenetischen Grundlagen einer Systemtheorie der Evolution. In: J. OTT / G.P. WAGNER / Fr. WUKETITS (Hrsg.): Evolution, Ordnung und Erkenntnis. Parey. Berlin u.a. 1985. S. 97-111
- WANG, D. / BUHMANN, J. / von der MALSBURG, Chr.: Pattern Segmentation in Associative Memory. Neural Computation. Vol. 2. 1990. PP. 94-106
- WANG, D.L.: Visual Scene Segmentation. In: M.A. ARBIB (Ed.): The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Edition. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 2002. PP. 1215-19
- WANG, X.-J.: Neural Oscillations. In: L. NADEL (Ed.): Encyclopedia of Cognitive Science. Vol. 3. Nature Publishing Group. London u.a. 2003. PP. 272-80
- WANG, X.-J.: Theoretical and Computational Neuroscience: Attractor Network Models. In: L.R. SQUIRE (Ed.): New Encyclopedia of Neuroscience. Elsevier Press. Amsterdam. 2008
- WARGLIEN, M. / GÄRDENFORS, P.: Semantics, Conceptual Spaces and the Meeting of Minds. Synthese. Published online 09 June 2011. PP. 1-29
From: DOI 10.1007/s11229-011-9963-z
- WATTS, D. / STROGATZ, St.: Collective Dynamics of Small Worlds. Nature. Vol. 393. 1998. PP. 440-42

- WEISKOPF, D.Aa.: The Plurality of Concepts. *Synthese*. Vol. 169. 2009. PP. 145-73
- WEISKRANTZ, L.: *Blindsight. A Case Study and Implications*. Oxford University Press. Oxford. 1986
- WEISS, Chr.: Die Information der Autopoiesis. In: D. BAECKER: *Schlüsselwerke der Systemtheorie*. Verlag für Sozialwiss. Wiesbaden. 2005. S. 243-52
- WEISÄCKER, C.Fr. von: *Die Einheit der Natur*. Studien. Deutscher Taschenbuch Verlag. 1. Aufl. 1974
- WEISÄCKER, C.Fr. von: *Aufbau der Physik*. Deutscher Taschenbuch Verlag. München. 1988
- WENDELKEN, J.C.: *SHRUTI-Agent: A Structured Connectionist Architecture for Reasoning and Decision-Making*. Dissertation. University of California. Berkeley. 2003
- WENDELKEN, C. / SHASTRI, L.: Acquisition of Concepts and Causal Rules in SHRUTI. In: R. ALTERMAN / D. HIRSH (Eds.): *Proceedings of the 25th Conference of the Cognitive Science Society*. Vol. 2. July 31st - Aug 2nd 2003. Boston/MA. 2003
- WENG, J. / McCLELLAND, J.L. / PENTLAND, A. / SPORNS, O. / STOCKMANN, I. / SUR, M.: Artificial Intelligence: Autonomous Mental Development by Robots and Animals. *Science*. Vol. 291. 2001. PP. 599-600
- WENNEKERS, T. / PASEMANN, Fr.: Synchronous Chaos in Highdimensional Modular Neural Networks. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 6. 1996. PP. 2055-67
- WERBOS, P.J.: *Beyond Regression. New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences*. Ph.D. Dissertation. Harvard University. 1974
- WERMTER, St. / SUN, R.: An Overview of Hybrid Neural Systems. In: St. WERMTER / R. SUN (Eds.): *Hybrid Neural Systems*. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2000. PP. 1-13
- WERNER, D.: *Funktionalanalysis*. 5. Aufl. Springer-Verlag. Berlin u.a. 2005
- WERNING, M.: How to Solve the Problem of Compositionality by Oscillatory Networks. In: J.D. MOORE / K.E. STENNING (Eds.): *Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2001. PP. 1094-99
- WERNING, M.: How to Compose Contents. A Review of Jerry Fodor's *In Critical Consition: Polemic Essays on Cognitive Science and the Philosophy of Mind*. *Psyche*. Vol. 8. 2002. PP. 1-9
From: <http://psyche.cs.monash.edu.au/v8/psyche-8-07-werning.html>
- WERNING, M.: *Kompositionalität und die Basis mentaler Begriffe*. Powerpoint Präsentationsmanuskript
From: www.phil-fak.uni-duesseldorf.de/.../Kompositionalitaet_und_die_Basis_mentaler_Begriffe
- WERNING, M.: Synchrony and Composition: Toward a Cognitive Architecture between Classicism and Connectionism. In: B. LÖWE / W. MALZKORN / T. RÄSCH (Eds.): *Foundations of the Formal Sciences II. Applications of Mathematical Logic in Philosophy and Linguistics, Papers of a Conference Held in Bonn November 10-13. 2000*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 2003. PP. 261-78

- WERNING, M.: Ventral vs. Dorsal Pathway: The Source of the Semantic Object/Event and the Syntactic Noun/Verb Distinction. Commentary in: J.R. HURFORD: The Neural Basis of Predicate-Argument Structure. The Behavioral and Brain Sciences. Vol. 26. 2003. PP. 299-300
- WERNING, M.: Compositionality, Context, Categories and the Indeterminacy of Translation. *Erkenntnis*. Vol. 60. 2004. PP. 145-78
- WERNING, M.: The Temporal Dimension of Thought: Cortical Foundations of Predicative Representation. *Synthese*. Vol. 146. 2005. PP. 203-24
- WERNING, M.: Right and Wrong Reasons for Compositionality. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. I: Foundational Issues. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 285-309
- WERNING, M.: Neuronal Synchronization, Covariation, and Compositional Representation. In: M. WERNING / E. MACHERY / G. SCHURZ (Eds.): The Compositionality of Meaning and Content. Vol. II: Applications to Linguistics, Psychology and Neuroscience. Ontos Verlag. Frankfurt. 2005. PP. 283-312
- WERNING, M.: The "Complex first Paradox": Why do Semantically thick Concepts so Early Lexicalize as Nouns? *Interaction Studies*. Vol. 9. 2008. PP. 67-83
- WERNING, M.: Non-symbolic Compositional Representation and its Neuronal Foundation: Towards an Emulative Semantics. In: M. WERNING / W. HINZEN / E. MACHERY (Eds.): The Oxford Handbook of Compositionality. Oxford University Press. Oxford. 2012. PP. 633-54
- WERNING, M. / MAYE, A.: The Neural Basis of the Object Concept in Ambiguous and Illusionary Perception. In: R. SUN / N. MIYAKE (Eds.): Proceedings of the Twenty-Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Lawrence Erlbaum Associates. London. 2006. PP. 876-81
- WESTHEIMER, G.: Was Helmholtz a Bayesian? *Perception*. Vol. 39. 2008. PP. 642-50
- WHITEHEAD, A.N. / RUSSELL, B.: *Principia Mathematica*. Vol. 1-3. 2nd Ed. Cambridge University Press. Cambridge. (1910-13) 1927
- WICKI, W.: *Entwicklungspsychologie*. Ernst Reinhardt Verlag. München, Basel. 2010
- WIDROW, B. / HOFF, M.E. Jr.: Adaptive Switching Circuits. In: Proceedings of the IRE Western Electric Show and Convention (WESCON) Conference. Part 4. Institute of Radio Engineers. New York. 1960. PP. 96-104
- WIDROW, B. / STEARNS, S.D.: *Adaptive Signal Processing*. Prentice Hall. Englewood Cliffs/NJ. 1985
- WIENER, N.: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2nd Ed. MIT Press. New York. 1948, 1961
- WIENER, N.: Perspectives in Cybernetics. In: N. WIENER / J.P. SCHADÉ (Eds.): *Cybernetics of the Nervous System*. Elsevier Publishing Company. Amsterdam u.a. 1965. PP. 399-408
- WILDGEN, W.: *Archetypensemantik. Grundlagen für eine dynamische Semantik auf der Basis der Katastrophentheorie*. Narr Verlag. Tübingen. 1985

- WILDGEN, W.: Teil I: Das dynamische Paradigma in der Linguistik. In: W. WILDGEN / L. MOTTRON (Eds.): *Dynamische Sprachtheorie. Sprachbeschreibung und Spracherklärung nach den Prinzipien der Selbstorganisation und der Morphogenese*. Studienverlag Brockmeyer. Bochum. 1987
From: www.fb10.uni-bremen.de/homepages/wildgen/pdf/das_dynamische_paradigma.pdf
- WILDGEN, W.: *Die Sprachwissenschaft des 20. Jahrhunderts. Versuch einer Bilanz*. Walter De Gruyter. Berlin, New York. 2010
- WILDGEN, W. / PLATH, P.J.: *Katastrophen- und Chaostheorie in der linguistischen Modellbildung*. In: R. KÖHLER / G. ALTMANN / R.G. PIOTROWSKI (Hrsg.): *Quantitative Linguistik. Quantitative Linguistics. Ein internationales Handbuch. An International Handbook*. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 2005. S. 688-705
- WILES, J. / HALLINAN, J. (Eds.): *Evolutionary Computation and Cognitive Science: Modeling Evolution and Evolving Models*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 5. Special Section. 2001. PP. 122-28 (reprinted in: D.B. FOGEL / C.J. ROBINSON (Eds.): *Computational Intelligence: The Experts Speak*. IEEE Press. San Diego. 2003. PP. 179-89)
- WILLKE, H.: *Systemtheorie*. 4. Aufl. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Jena. 1993
- WILLSHAW, D.J. / BUNEMAN, O.P. / LONGUET-HIGGINS, H.C.: *Non-Holographic Associative Memory*. *Nature*. Vol. 222. 1969. PP. 960-62
- WILSON, H.R.: *Spikes, Decisions, and Actions: The Dynamical Foundations of Neuroscience*. Oxford University Press. New York. 1999
- WILSON, H.R. / COWAN, J.D.: *Excitatory and Inhibitory Interactions in Localized Populations of Model Neurons*. *Biophysical Journal*. Vol. 12. 1972. PP. 1-24
- WILSON, R.A. / FOGLIA, L.: *Embodied Cognition*. In: E.N. ZALTA (Ed.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (July 25, 2011 Edition)
From: <http://plato.stanford.edu/entries/embodied-cognition/>
- WILSON, M.: *Six Views of Embodied Cognition*. *Psychonomic Bulletin & Review*. Vol. 9. 2002. PP. 625-36
- WILSON, R.A. / KEIL, Fr.C. (Eds.): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. The MIT Press. Cambridge/MA, London. 1999
- WINFREE, A.T.: *Biological Rhythms and the Behavior of Populations of Coupled Oscillators*. *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 16. 1967. PP. 15-42
- WINKEL, S. / PETERMANN, Fr. / PETERMANN, U.: *Lernpsychologie*. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn. 2006. S. 157-67
- WISCHMANN, S. / HÜLSE, M. / KNABE, J. / PASEMANN, Fr.: *Synchronization of Internal Neural Rhythms in Multi-Robotic Systems*. *Adaptive Behavior*. Vol. 14. 2006. PP. 117-27
- WISKOTT, L. / MALSBURG, Chr. von der: *Face Recognition by Dynamic Link Matching*. In: J. SIROSH / R. MIKKULAINEN / Y. CHOE (Eds.): *Lateral Interactions in the Cortex: Structure and Function*. 1996
From: <http://www.cs.utexas.edu/users/nn/web-pubs/htmlbook96/>

- WISKOTT, L. / MALSBURG, Chr. von der: Objekterkennung in einem selbstorganisierenden neuronalen System. In: K. MAINZER (Hrsg.): Komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 1999. S. 169-88
- WITTGENSTEIN, L.: Tractatus logico-philosophicus. In: Ludwig Wittgenstein. Werkausgabe. Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus. Tagebücher 1914-16. Philosophische Untersuchungen. 7. Aufl. Suhrkamp Verlag. Berlin (1921) 1990. S. 7-86
- WITTGENSTEIN, L.: Some Remarks on Logical Form. Aristotelian Society Supplementary. Vol. 9. Knowledge, Experience and Realism. 1929. PP. 162-71 (reprinted in: J.C. KLAGGE / A. NORDMANN (Eds.): Ludwig Wittgenstein. Philosophical Occasions 1912-51. Hackett Publishing Company. Indianapolis. 1993. PP. 29-35)
- WITTGENSTEIN, L.: Philosophische Untersuchungen. In: Ludwig Wittgenstein. Werkausgabe. Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus. Tagebücher 1914-16. Philosophische Untersuchungen. Suhrkamp Verlag. 7. Aufl. Frankfurt am Main. (1953) 1990
- WITTGENSTEIN, L.: The Blue and Brown Books. Second Edition. Blackwell. Oxford. 1969
- WITTGENSTEIN, L. (J. SCHULTE (neu durchges.)): Werkausgabe. Suhrkamp. Frankfurt am Main. 1989-95
- WITTGENSTEIN, L. (M. NEDO (Hrsg.)): Wiener Ausgabe. Springer-Verlag. Wien u.a. 1993-2000
- WOLFE, J.M.: Visual Search. In: H. PASHLER (Ed.): Attention. Psychological Press. Hove/UK. 1998. PP. 14-73
- WOLFE, J.M. / CAVE, K.R.: The Psychophysical Evidence for a Binding Problem in Human Vision. Neuron. Vol. 24. 1999. PP. 11-17
- WOLFF, M.P.H. / HAUCK, P. / KÜCHLIN, W.: Mathematik für Informatik und Bioinformatik. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg u.a. 2004
- WOMELSDORF, T. / SCHOELEN, J.-M. / OOSTENVELD, R. / SINGER, W. / DESIMONE, R. / ENGEL, A.K. / FRIES, P.: Modulation of Neuronal Interactions through Neuronal Synchronization. Science. Vol. 316. 2007. PP. 1609-12
- WOODWARD, J.: What is a Mechanism? A Counterfactual Account. Philosophy of Science. Supplement. Vol. 69. 2002. PP. S366-77
- WUKETITS, Fr.M.: Die Systemtheorie der Evolution – eine neue Sehweise der Entwicklung des Lebendigen. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht. Bd. 34. 1981. S. 1-7
- WUKETITS, Fr.M.: Grundriß der Evolutionstheorie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 1982. S. 132-40
- WUKETITS, Fr.M.: "Systems Everywhere". Aspekte einer biologischen Systemtheorie. In: K. EDLINGER / W. FEIGL / G. FLECK (Hrsg.): Systemtheoretische Perspektiven. Der Organismus als Ganzheit in der Sicht von Biologie, Medizin und Psychologie. Peter Lang. Frankfurt am Main u.a. 2000. S. 44-50

- WUNDERLICH, J.: Erweiterung des RNN-Modelles um SHRUTI-Konzepte: Vom aussagenlogischen zum Schließen über prädikatenlogischen Programmen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Fakultät für Informatik. 1998
- WUNSCH, G.: Geschichte der Systemtheorie. Dynamische Systeme und Prozesse. Akademie-Verlag. Berlin. 1985
- WUSSING, H.: 6000 Jahre Mathematik. Eine kulturgeschichtliche Zeitreise. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2009
- YANARU, T. / HIROTJA, T. / KIMURA, N.: An Emotion-Processing System Based on Fuzzy Inference and its Subjective Observations. International Journal of Approximate Reasoning. Vol. 10. 1994. PP. 99-122
- YANG, B.-S. / HAN, T. / KIM, Y.-S.: Integration of ART-Kohonen Neural Network and Case-Based Reasoning for Intelligent Fault Diagnosis. Expert System with Applications. Vol. 26. 2004. PP. 387-95
- YAO, Y. / FREEMAN, W.J.: A Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics. Neural Networks. Vol. 3. 1990. PP. 153-70
- YEGNANARAYANA, B.: Artificial Neural Networks for Pattern Recognition. Sādhanā. Vol. 19. 1994. PP. 189-238
- ZABEL, Th.: Klassifikation mit neuronalen Netzen. CARTE. Cooperative Adaptive Resonance Theory Ensembles. Logos Verlag. Berlin. 2005
- ZADEH, L.A.: From Circuit Theory to System Theory. Proceedings of the Institute of Radio Engineers. Vol. 50. 1962. (reprinted in: G.J. KLIR: Facets of Systems Science. Plenum Press. New York, London. 1991. PP. 309-23)
- ZADEH, L.A.: Fuzzy Sets. Information and Control. Vol. 8. 1965. PP. 338-53
- ZADEH, L.A.: The Concept of System, Aggregate, and State in System Theory. In: L.A. ZADEH / E. POLAK (Eds.): System Theory. McGraw-Hill. New York. 1969. PP. 3-42
- ZEEMAN, E.C.: Catastrophe Theory. Scientific American. Vol. 234. 1976. PP. 65-70, 75-83
- ZELNY, M.: Autopoiesis: A Paradigm Lost? In: M. ZELNY (Ed.): Autopoiesis, Dissipative Structure, and Spontaneous Social Orders. Westview Press. Boulder/CO. 1980. PP. 3-43
- ZELNY, M.: What is Autopoiesis? In: M. ZELNY (Ed.): Autopoiesis: A Theory of the Living Organizations. North Holland. New York 1981. PP. 4-17
- ZELL, A.: Simulation Neuronaler Netze. 2. Aufl. R. Oldenbourg Verlag. München, Wien. 1997
- ZHOU, H. / FRIEDMAN, H.S. / von der HEYDT, R.: Coding of Border Ownership in Monkey Visual Cortex. Journal of Neuroscience. Vol. 20. 2000. PP. 6594-6611
- ZHU, J. / MALSBERG, Chr. von der: Synapto-Synaptic Interactions Speed Up Dynamic Link Matching. Neurocomputing. Vol. 44-46. 2002. PP. 721-28
- ZIEMKE, A. / CARDOSO DE OLIVEIRA, S.: Neuronale Repräsentationen. Zum Repräsentationalistischen Forschungsprogramm in der Kognitionsforschung. In: A. ZIEMKE / O. BREIDBACH (Hrsg.): Repräsentationismus – was sonst? Eine Auseinandersetzung mit dem repräsentationalistischen Forschungsprogramm in den Neurowissenschaften. Vieweg. Braunschweig. 1996. S. 1-28
- ZIEMKE, T.: What's that Thing Called Embodiment? In: R. ALTERMAN / D. KIRSH (Eds.): Proceedings of the 25th Annual Conference of the Cognitive Science

- Society. Lawrence Erlbaum. Mahwah/NJ. 2003. PP. 1134-39
- ZIEREP, J. / BÜHLER, K.: Grundzüge der Strömungslehre. Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide. 8. Aufl. Vieweg + Teubner. Wiesbaden. 2010
- ZIPPELIUS, A.: Statistical Mechanics of Neural Networks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Vol. 194. 1993. PP. 471-81
- ZOGLAUER, Th.: Der Informationsgehalt empirischer Modelle – zur Logik des semantischen Informationsbegriffs. In: I. MAX / W. STELZNER (Hrsg.): Logik und Mathematik. Frege-Kolloquium Jena 1993. De Gruyter Verlag. Berlin. 1995. S. 484-95
- ZOGLAUER, Th.: Can Information be Naturalized? In: K. KORNWACHS / K. JACOBY (Eds.): Information: New Questions to a Multidisciplinary Concept. Akademie Verlag. Berlin. 1996. PP. 187-207

