Aus der Radiologischen Universitätsklinik Tübingen
Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie
Ärztliche Direktorin: Professor Dr. med. U. Ernemann
Sektion für Experimentelle Kernspinresonanz
des Zentralen Nervensystems
Leitung: Professor Dr. med. Dipl.-Biol. W. Grodd

Neuronale Grundlagen sozialer Kognition – fMRT Untersuchungen zur Theory of Mind

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Mohammed Naushad Bijoy Atique

aus

Frankfurt am Main

2010

Aus der Radiologischen Universitätsklinik Tübingen
Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie
Ärztliche Direktorin: Professor Dr. med. U. Ernemann
Sektion für Experimentelle Kernspinresonanz
des Zentralen Nervensystems
Leitung: Professor Dr. med. Dipl.-Biol. W. Grodd

Neuronale Grundlagen sozialer Kognition – fMRT Untersuchungen zur Theory of Mind

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Mohammed Naushad Bijoy Atique

aus

Frankfurt am Main

2010

Dekan:	Professor Dr. I. B. Autenrieth
1. Berichterstatter:	Professor Dr. Dipl.-Biol. W. Grodd
2. Berichterstatter:	Professor Dr. H.-P. Thier

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung 1
1.1 Einführung 1
1.2 Theory of Mind 2
1.2.1 Die Entwicklung von Theory of Mind 2
1.2.2 Funktionsweise der Theory of Mind 5
1.2.3 Mit der Theory of Mind assoziierte Hirnareale 8
1.3 Magnetresonanztomografie 19
1.3.1 Funktionelle Magnetresonanztomografie 21
1.3.2 Hämodynamische Antwort 23
1.3.3 Gestaltung eines fMRT-Experiments 24
1.3.4 Echoplanartechnik 25
1.4 Ziel der vorliegenden Untersuchung 26
1.4.1 Vergleich der Hirnaktivität beim Erkennen zweier unterschiedlicher mentaler Zustände 26
1.4.2 Aktivierung in der temporo-parietalen Junktion 27
1.4.3 Das Vorgehen in der vorliegenden Untersuchung 28

2 Materialien und Methoden 29
2.1 Probandenkollektiv 29
2.1.1 Aufklärung und Vorbereitung 29
2.1.2 Gerätekomponenten 30
2.2 Stimuli 30
2.2.1 Comic Kategorien 30
2.2.2 Präsentation der Stimuli 35
2.2.3 Projektion der Stimuli 36
2.3 Versuchsanordnung 36
2.4 Datenerhebung mit dem Magnetresonanztomografen 41
2.4.1 Messung der morphologischen MRT-Daten 41
2.4.2 Messung der funktionellen MRT-Daten 42
2.5 Auswertung der funktionellen MRT-Daten 42

2.5.1 Vorverarbeitung 43
2.5.2 Datenanalyse der funktionellen MRT-Daten 46
2.5.2.1 Designmatrix 46
2.5.2.2 Das Generelle Lineare Modell (GLM) 47
2.5.2.3 Kontraste 48
2.5.2.4 Untersuchung der räumlichen Aktivierungsmaxima während unterschiedlicher Bedingungen 50
2.6 Analyse der Task Performance 51

3 Ergebnisse 52
3.1 Task Performance 52
3.1.1 Antwortzeiten 52
3.1.2 Antworttrefferquoten 53
3.2 Hirnaktivität 53

4 Diskussion 66
4.1 Aktivierung in der temporo-parietalen Junktion 66
4.2 Aktivierung im medialen präfrontalen Kortex 69
4.3 Aktivierung im Precuneus 71
4.4 Aktivierung im Lobus parietalis superior 72
4.5 Aktivierung in der Amygdala 73

5 Zusammenfassung 74

6 Abkürzungen 75

7 Abbildungen 77

8 Tabellen 79

9 Literatur 80

10 Anhang 1 92

11 Anhang 2 102

12 Anhang 3 105

13 Danksagung 108

14 Curriculum Vitae 110

1 Einleitung

1.1 Einführung

In den letzten Jahren haben Neurowissenschaftler zunehmend ihre Aufmerksamkeit auf die soziale Kognition gelenkt. Der Begriff der sozialen Kognition subsumiert eine Vielzahl kognitiver Prozesse zur erfolgreichen Interaktion mit einer sozialen Umgebung. Diese Interaktion setzt die Wahrnehmung und Differenzierung der eigenen Person von anderen Personen voraus (Beer und Ochsner 2006). Soziale Kognition hilft uns bei der Bewältigung des Alltags, indem sie eine Einschätzung der sozialen Umgebung und damit das Planen eigener Handlungen ermöglicht. Zur sozialen Kognition gehört auch die Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit einer Person, das Erkennen, ob man betrogen wird (Adolphs 2003), und die Vorstellungskraft, die z.B. Autoren in ihren Romanen das Erschaffen fiktiver Welten ermöglicht (Decety und Grèzes 2006). Eine weitere wichtige Komponente der sozialen Kognition ist die Fähigkeit, sich in eine andere Person hineinzuversetzen und so deren mentalen Zustand zu erkennen. Diese Fähigkeit wird als *mentalizing* oder *Theory of Mind* (ToM) bezeichnet (Frith und Frith 1999; Saxe et al. 2003). Es gibt viele unterschiedliche mentale Zustände – einige unsere alltäglichen Handlungen betreffende mentale Zustände sind Überzeugungen, Intentionen und Emotionen. Das Erkennen von mentalen Zuständen ist entscheidend für die angemessene Reaktion auf die Menschen in unserer Umgebung. Dadurch wird ein funktionierendes Verhältnis zu anderen Menschen in einer sozialen Umgebung aufrechterhalten.

Doch welche Hirnareale sind an ToM beteiligt? Ist für jeden mentalen Zustand ein anderes Hirnareal zuständig oder ist ein Netzwerk von Hirnarealen an der ToM unabhängig vom mentalen Zustand beteiligt?

Um Fragen der beteiligten Hirnareale nachzugehen, verwenden ToM-Studien Bildgebungsverfahren wie die Positronen-Emissionstomografie (PET) oder die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT). Diese Bildgebungsverfahren ermöglichen die nicht invasive Darstellung von Hirnarealen, die an den gesuchten Prozessen beteiligt sind. In den meisten ToM-Studien, wie auch der vorlie-

genden Arbeit, kommt die fMRT zur Anwendung. Sie ermöglicht durch Nutzung des *blood oxygen level dependent* (BOLD)-Effektes die Erfassung von aktiven Hirnarealen (Logothetis und Wandell 2004; Ogawa et al. 1990 a, b; Turner et al. 1991) bei speziellen Aufgaben.

Erkenntnisse über die beteiligten Hirnareale sollen ein besseres Verständnis für die während der ToM ablaufenden Prozesse im Gehirn ermöglichen und somit zur Aufklärung der Funktionsweise der ToM beitragen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf zwei Bereiche der ToM und vergleicht diese miteinander: das Erkennen von Intentionen und Emotionen.

1.2 Theory of Mind

Theory of Mind (ToM), das Erkennen von mentalen Zuständen, beruht auf dem Bewusstsein, dass andere Menschen Perspektiven, Vorstellungen und Wünsche haben, die sich zum einen von den eigenen und zum anderen von der Realität unterscheiden können. Diese Unterschiede müssen beachtet werden, um das Verhalten anderer Menschen erklären zu können (Frith und Frith 1999; Gallagher und Frith 2003). Die ToM ist eine wesentliche Voraussetzung für das funktionierende Zusammenleben mit unseren Mitmenschen, denn je besser wir Vorraussagen über den nächsten Schritt einer Person machen können, desto besser können wir mit ihr interagieren (Frith 2007). Ob im Verkehr oder bei der Arbeit, ob im Freundeskreis oder in der Familie – ständig überlegt man sich, meist unbewusst, welche Intentionen jemand hat, wie sich jemand fühlt, welche Überzeugung jemand hat. Zum Erkennen des mentalen Zustandes einer Person werden diverse Sinnesinformationen herangezogen; unter anderem die momentane Gesamtsituation, aber auch die Blickrichtung und Körperhaltung und natürlich auch die Mimik des Gegenübers (Frith und Frith 2006).

1.2.1 Die Entwicklung von Theory of Mind

Die ToM entwickelt sich bereits in der frühen Kindheit. Richtet eine Person seine Aufmerksamkeit auf ein Objekt, so kann bereits ein 12 Monate altes Kind,

welches die Person beobachtet, seine Aufmerksamkeit ebenfalls auf dieses Objekt richten, wenn es in seinem Gesichtsfeld liegt. Ab 18 Monaten ist dieses kindliche Verhalten sogar unabhängig vom Gesichtsfeld (Johnsons 2003).

Dreijährige verstehen bereits, dass nur diejenige Person Aussagen über den Inhalt eines Kartons machen kann, welche einen Blick in den Karton geworfen hat (Frith und Frith 2003; Hogrefe et al. 1986). Im Alter von vier Jahren können Kinder in der Regel die Überzeugung von anderen bezüglich einer Sache voraussagen (Frith und Frith 2003; Baron-Cohen et al. 1985; Wimmer und Perner 1983).

Zur Untersuchung der ToM bei Kindern werden *false belief*-Aufgaben verwendet, bei denen die „falsche“ Überzeugung (*false belief*) einer Person erkannt werden soll. Häufig werden dazu Kurzgeschichten wie die von Sally und Ann verwendet: Sally und Ann spielen mit ihren Spielsachen in einem Zimmer. Nach einiger Zeit legt Sally ihre Puppe in ihren Puppenwagen und verlässt das Zimmer. Ann holt die Puppe nun aus dem Puppenwagen und legt sie in ihre Kiste (**Abb. 1**). Die Kinder werden anschließend gefragt, wo Sally ihre Puppe nach ihrer Rückkehr suchen wird. In der Regel antworten bereits Vierjährige, dass Sally in ihrem Puppenwagen nachschauen werde, da sie der „falschen“ Überzeugung sei, dass ihre Puppe sich immer noch dort befinde. Die Kinder können somit bereits zwischen dem eigenen Wissen und dem Wissen einer anderen Person differenzieren und die Unterschiede zur Deutung des Verhaltens dieser Person heranziehen.

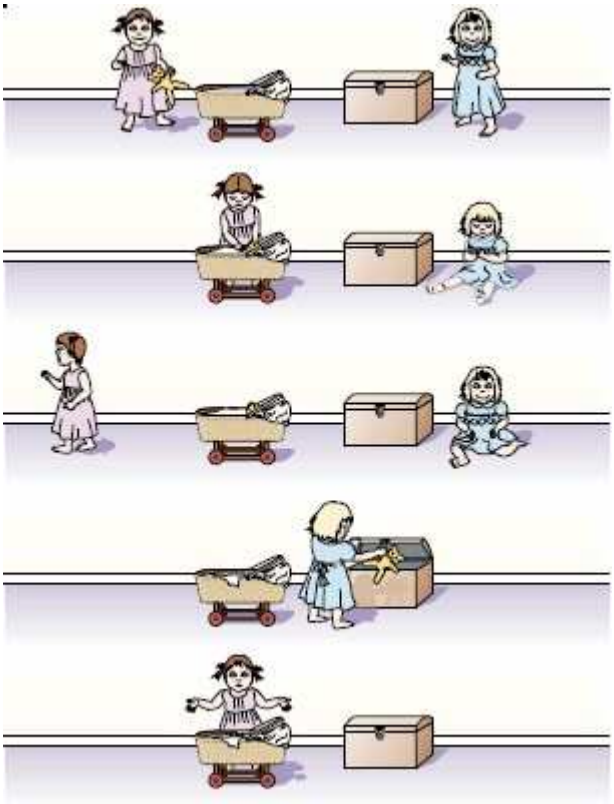

Abb. 1: Sally-Ann Aufgabe: Eine klassische *false belief*-Aufgabe, bei der ein Kind eine Puppe in ihren Puppenwagen legt und daraufhin das Zimmer verlässt. Das zweite Kind im Zimmer holt die Puppe nun aus dem Puppenwagen und legt sie in ihre Kiste. Kinder, denen diese Bildergeschichte gezeigt wird, sollen nun sagen, wo das erste Kind nach seiner Rückkehr nach der Puppe schauen wird. Aus: Adolphs (2003)

Schwierigere ToM-Aufgaben sind z. B. *second-order false belief*-Aufgaben, bei denen erkannt werden soll, was eine Person über die Überzeugung einer anderen Person denkt, d. h. was z. B. Anne glaubt, welcher Überzeugung Tim bezüglich einer Sache ist (Sullivan et al. 1994). Solche *second-order false belief*-Aufgaben bereiten Kindern ab etwa fünf bis sechs Jahren keine Schwierigkeiten mehr. Ab sechs Jahren können Kinder zunehmend sicherer alle mentalen Zustände erkennen. Sie sind dann in der Lage, die Differenzen bezüglich Perspektiven, Wünschen, Absichten, Gefühlen und Überzeugungen zwischen ihnen und anderen zu erkennen. Diese Informationen können sie zum Deuten des Verhaltens anderer Personen heranziehen. Dies wird etwa an Comics deutlich, deren Inhalt nur mit dem Erkennen der Intention einer Figur verstanden werden kann (**Abb. 2**).

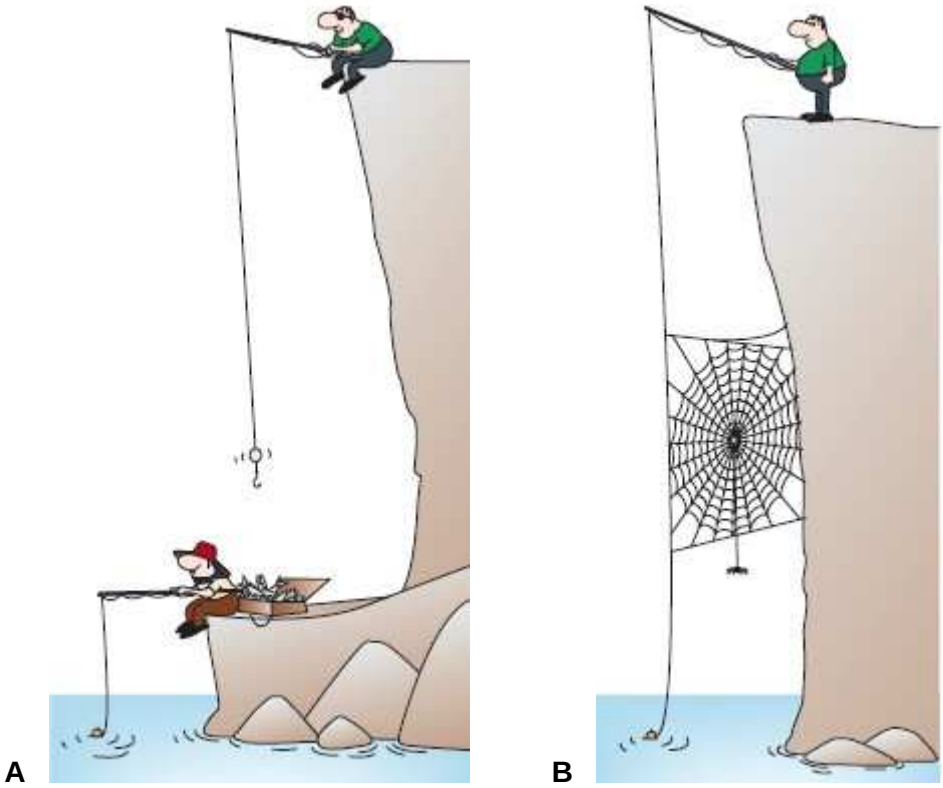

Abb. 2: Das Verhalten von Personen deuten: Zum Verstehen des Witzes in (**A**) muss man die Intention des oberen Anglers erkennen. In (**B**) hingegen benötigt man keine ToM zum Verstehen des Witzes. Aus: Amodio und Frith (2006)

1.2.2 Funktionsweise der Theory of Mind

Obwohl über die Entwicklung der ToM bereits sehr viel in Erfahrung gebracht werden konnte (**siehe 1.2.1**), ist man sich über die Funktionsweise der ToM noch nicht einig. Die beiden am häufigsten diskutierten Hypothesen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Theory-Theory

Premack und Woodruff (1978) entwickelten die *Theory-Theory*. Danach beruht die Aneignung von ToM-Fähigkeiten auf der Entwicklung von Theorien, die auf einer Reihe von Konzepten und grundlegenden Prinzipien basieren. Ein

Prinzip dabei ist, dass Menschen handeln, um ihre Wünsche gemäß ihren Vorstellungen zu erfüllen.

Die Theorien entwickeln sich bereits im Kindesalter durch die gemachten Erfahrungen. Dabei werden die durch neue Erfahrungen hinzugewonnen Informationen zum Überdenken und Verbessern der Theorien genutzt.

Mit solchen auf Kausalität basierenden Theorien können die Interaktionen der mentalen Zustände einer Person nachvollzogen werden, und dadurch kann auch das Verhalten der Person abgeleitet werden (Apperly 2008). Zusammen mit initialen Informationen zu einer Person bilden diese Theorien die Grundlage für das Erkennen von mentalen Zuständen und das damit einhergehende Verständnis für das Verhalten (**Abb. 3**).

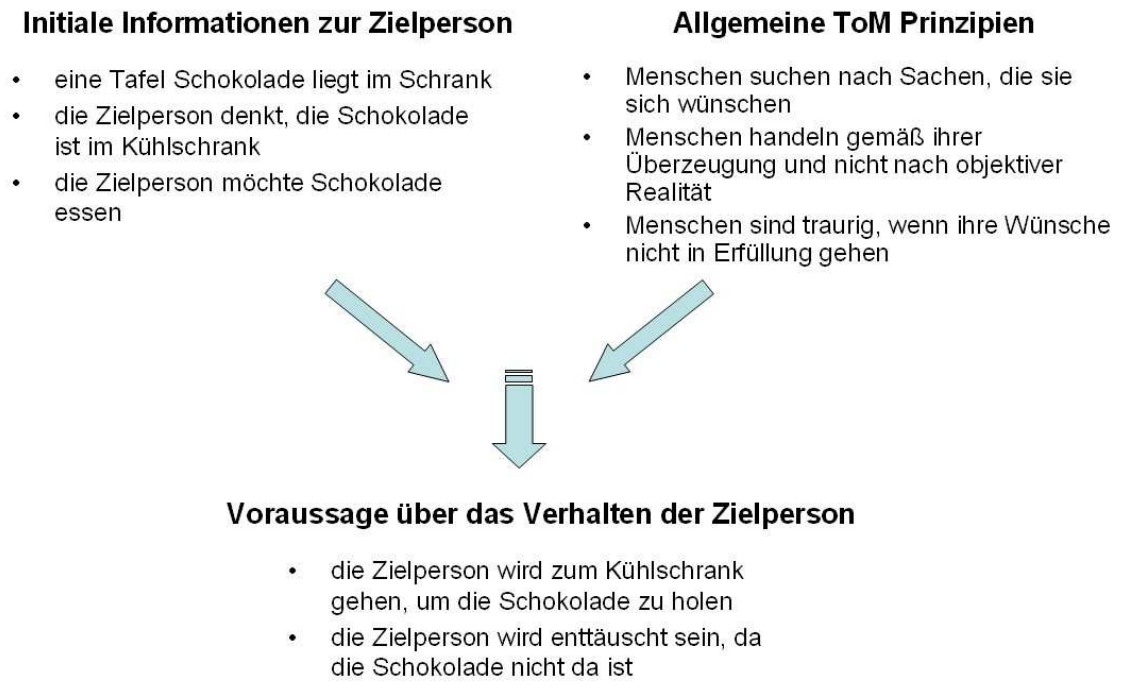

Abb. 3: *Theory-Theory*: Allgemeine Prinzipien der ToM werden auf initiale Informationen der Zielperson angewandt, um ihr Verhalten vorauszusagen. Modifiziert nach Apperly (2008)

Simulation-Theory

Der Anspruch der *Theory-Theory*, alle Fälle der ToM erklären zu können, stieß auf Skepsis und führte daher zur Entwicklung der *Simulation-Theory* (z. B. Gordon 1986; Heal 1986). Die *Simulation-Theory* sieht die Grundlage der ToM in der Fähigkeit, sich gedanklich in jemanden hineinzuversetzen. Da die Prozesse bei der eigenen Entscheidungsfindung und der Entscheidungsfindung anderer Personen in ihren kausalen Eigenschaften grundlegend übereinstimmen, kann der eigene Verstand die wahrscheinlich ablaufenden Gedankenprozesse in einer anderen Person simulieren. Die Ergebnisse dieser Simulation steuern dann nicht das eigene Verhalten, sondern werden zur Verhaltensvoraussage auf die andere Person übertragen (Apperly 2008) (**Abb. 4**). Im Gegensatz zur *Theory-Theory*, nach der sich die ToM mit zunehmender Erfahrung verbessert, geht die *Simulation-Theory* davon aus, dass die ToM angeboren ist und intuitiv angewendet wird.

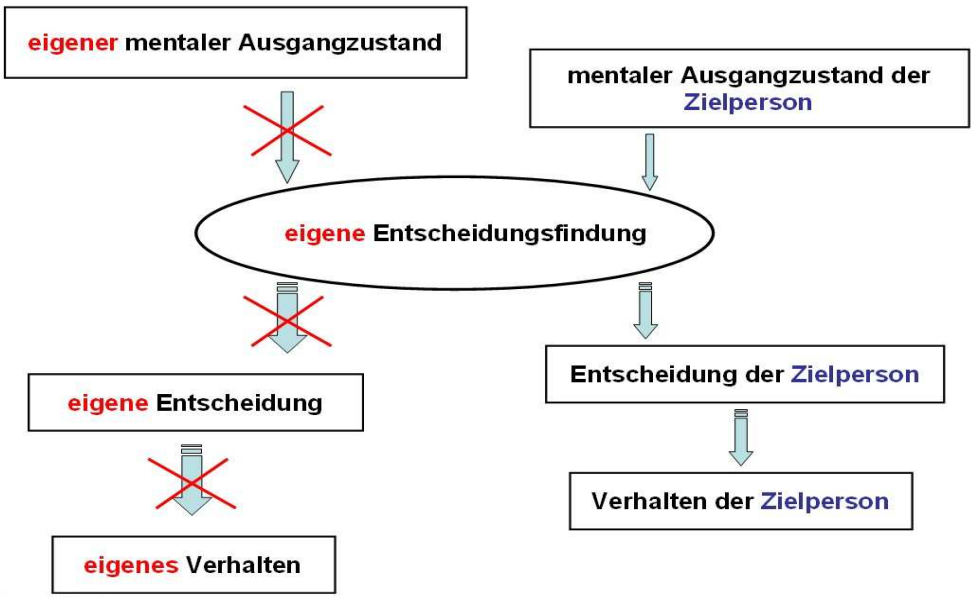

Abb. 4: *Simulation-Theory*: Der eigene mentale Zustand und die damit verbundene Entscheidung werden unterdrückt, um mit der eigenen Entscheidungsfindung die Gedankenprozesse einer Zielperson zu simulieren und dadurch auf ihr Verhalten zu schließen. Modifiziert nach Apperly (2008)

1.2.3 Mit der Theory of Mind assoziierte Hirnareale

Funktionelle Bildgebungsstudien haben eine Reihe von Hirnarealen identifiziert, die an der ToM beteiligt zu sein scheinen. Zu diesen Hirnarealen zählen der posteriore Sulcus temporalis superior (STS), die Poli temporales, der Precuneus, die temporo-parietale Junktion (TPJ) und der mediale präfrontale Kortex (MPFC), zu dem insbesondere der paracinguläre Kortex gehört (Amodio und Frith 2006; Blakemore 2008; Frith und Frith 2003; Gallagher und Frith 2003; Gilbert et al. 2006). Die wichtigsten ToM-Studien mit Angabe der Lokalisation der Aktivierung in den verschiedenen Hirnarealen sind in **Anhang 1** zusammengestellt. In dieser Tabelle sind die einzelnen Regionen im *Montreal Neurological Institute* (MNI)-Koordinatensystem mit x, y, z-Koordinaten als *region of interest* (*ROI*) definiert. Die TPJ-Region (MNI-Koordinaten: x = 34-73, y = -40--80, z = 6-44) und der MPFC (MNI-Koordinaten: x = 0-18, y = 50-63, z = 0-40) zeigen dabei fast durchgehend eine Aktivierung, die jedoch mit ganz unterschiedlichen Subfunktionen der ToM assoziiert sind, sodass ihre eigentlichen Rollen noch unklar sind und heftig diskutiert werden. Eine Auswahl aus **Anhang 1** mit den am häufigsten diskutierten Studien ist der **Tab. 1** zu entnehmen.

Der in der vorliegenden Arbeit während des Erkennens von Intentionen aktivierte Lobus parietalis superior (*superior parietal lobule*, SPL) sowie die während des Erkennens von Emotionen aktivierte Amygdala werden ebenfalls kurz vorgestellt.

Tab. 1: Auswahl an ToM-Studien mit Aktivierungen in mit der ToM assoziierten Hirnarealen. Alle Koordinaten sind im MNI-Koordinatensystem angegeben (∅ = keine Angaben, AFC = Auswahl aus vorgegebenen Antworten [answer forced choice], aus TAL = aus Tailarach-Koordinaten in Montreal Neurological Institute (MNI)-Koordinaten umgewandelt, fMRT = funktionelle Kernspintomografie, k = Clustergröße, MPFC = medialer präfrontaler Kortex, p = Wahrscheinlichkeit, p* = korrigierte Wahrscheinlichkeit, PET = Positronen-Emissionstomografie, STS = Sulcus temporalis superior, ToM = Theory of Mind, TP = Polus temporalis, TPJ = temporo-parietale Junktion, vs. = versus)

	Stimuli	**Aufgabe**	**Kontrast**	**Statistische Kriterien**	**TPJ rechts**	**TPJ links**	**MPFC**	**Precu-neus**	**STS rechts**	**STS links**	**TP rechts**	**TP links**
					x: 34-73 y: -40--80 z: 6-44	**x: -34--73 y: -40--80 z: 6-44**	**x: 0-(-)18 y: 50-63 z: 0-40**	**x: 0-(-)18 y: -48--72 z: 4-65**	**x: 38-66 y: 8--58 z: 21--32**	**x: -38--66 y: 8--58 z: 21--32**	**x: 38-63 y: -15-21 z: -15--56**	**x: -38--63 y: -15-21 z: -15--56**
Undefinierte mentale Zustände												
Fletcher et al. (1995 b) PET	Geschichten (ToM/Nicht-ToM/ einzelne Sätze)	Antwort in Gedanken	ToM vs. einzelne Sätze	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse		-46 -58 24 (aus TAL)	-12 50 35 (aus TAL)			-44 -58 20 (aus TAL)	44 18 -16 (aus TAL)	-47 21 -24 (aus TAL)
			ToM vs. Nicht-ToM		47 -49 26 (aus TAL)							
Gallagher et al. (2000) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Antwort in Gedanken auf Fragen bezüglich Intentionen	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	73 -53 8 (aus TAL)	-48 -56 31 (aus TAL)	-8 56 1 (aus TAL)				59 10 -56 (aus TAL)	-51 12 -45 (aus TAL)
	Karikaturen (ToM/Nicht-ToM)	Anschauen und verstehen	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	64 -43 25 (aus TAL)			15 -48 65 (aus TAL)				
(False) belief												
Saxe & Kanwisher (2003) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Lesen in Gedanken	Experiment 1: ToM vs. Nicht-ToM (keine Menschen)	p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse	51 -54 2	-54 -60 21			66 -18 -15	-57 -27 -12		

		2 AFC zur Geschich-te (Text)	Experiment 2: ToM vs. Nicht-ToM (false photograph[1])	p = 0,0001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	54 -51 18	-48 -63 33	6 57 18	3 -54 30 -9 -51 33	54 -18 -15			
Perner et al. (2006) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	2 AFC zum Schluss der Geschichte (Text) oder Frage zur Geschichte	ToM vs. Nicht-ToM (false photograph[1])	p = 0,001 p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse	54 -57 27	-48 -57 30	-15 54 36	9 -54 33	39 -30 12			
		Lesen in Gedanken	ToM vs. Nicht-ToM (Erkennen zeitlicher Veränderungen)		51 -66 27	-45 -57 27						
Mitchell (2008) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	2 AFC zum Ende der Geschichte	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = 25 Ganzhirnanalyse	54 -51 27		6 60 30	3 -57 24				
Überlegung												
Saxe & Powell (2006) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Lesen in Gedanken	ToM vs. Nicht-ToM (false photographs[1])	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	60 -57 15	-51 -57 27	-9 51 3		60 -18 -21			
	Geschichten (ToM/Aussehen/ körperliches Empfinden)	Knopfdruck, wenn man fertig ist mit Lesen	ToM vs. Nicht-Tom (Aussehen und körperliches Empfin-den)	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	57 -54 18	-60 -54 24		0 -51 39				

1 *false photograph*: Angaben, die nicht mehr der präsentierten Realität entsprechen (Zaitchik 1990)

Posteriorer Sulcus temporalis superior (STS)

Der Sulcus temporalis superior (STS) ist von den Brodmann Arealen 6, 11, 22, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 52 umgeben. Über eine Aktivierung im posterioren STS wird berichtet, wenn Probanden *biological motions*, d. h. Bewegungen eines Objektes, die eine bestimmte Handlung erkennen lassen, beobachten (Allison et al. 2000). Die durch eine solche *biological motion* hervorgerufene Aktivierung im posterioren STS findet sich auch bei Bewegungen des ganzen Körpers und einzelner Körperteile (Bonda et al. 1996; Grezes et al. 1998; Pelphrey et al. 2005; Puce et al. 1998). Beobachten Probanden die Augenbewegungen einer anderen Person, so ist der posteriore STS ebenfalls aktiv (Pelphrey et al. 2004 a, b; Pelphrey et al. 2005; Wicker et al. 1998). Der STS scheint im Besonderen an der Erkennung von Intentionen und Handlungen aus beobachteten Bewegungen beteiligt zu sein (Castelli et al. 2000; Gobbini et al., 2007; Saxe et al. 2004; Schultz et al. 2003; Schultz et al 2004; Spiers and Maguire 2006).

Poli temporales

Die Poli temporales liegen im Brodmann Areal 38. Über die Poli temporales erhalten wir Zugang zu sozialem Wissen (*social knowledge*). Soziales Wissen schließt das Erkennen von bekannten Gesichtern und Stimmen sowie ganzer Szenen aus unterschiedlichen Situationen (Nakamura et al. 2000; Nakamura et al. 2001) ein und dient so als „Speicher“ autobiografischer Erinnerungen (Maguire und Mummery 1999; Maguire et al. 2000). Soziales Wissen beruht auch auf Erfahrungen, die man beim Erreichen der eigenen Ziele gemacht hat. Das zum Erreichen der Ziele notwendige Verhalten wird dabei ebenso abgespeichert wie die Folgen dieses Verhaltens. Diese als sogenannte *scripts* (Frith und Frith 2003) abgespeicherten Erfahrungen führen somit in bestimmten Situationen zu den gleichen Verhaltensmustern. Geht man z. B. in ein Restaurant, so wird in den Poli temporales das *restaurant script* abgerufen, das einzelne Stufen vorgibt: zunächst erwartet man die Karte, als nächstes bestellt man ein Menu und so weiter bis man bei der letzten Stufe, dem Bezahlen, angelangt ist.

Diese *scripts* scheinen auch beim Erkennen eines mentalen Zustandes einer Person abgerufen zu werden (Fletcher et al. 1995 b; Gallagher et al. 2000; Ruby und Decety 2004; Vogeley et al. 2001).

Precuneus

Der Precuneus liegt im Brodmann Areal 7. Der Precuneus ist am episodischen Gedächtnis und der bildlichen Vorstellungskraft beteiligt (Fletcher et al. 1995 a; Gallagher et al. 2000). Über Aktivierung im Precuneus wird auch bei der Unterscheidung von Perspektiven berichtet (Vogeley und Fink 2003). Die Zuordnung einer Handlung zu einer Person als Verursacher der Handlung ist eine weitere Funktion mit Precuneus Beteiligung.

In einem Review zum Precuneus bestätigen Cavanna und Trimble (2006) nach Durchsicht von Studien zur Makro- und Mikroanatomie des Precuneus, seinen subkortikalen und kortikalen Verbindungen sowie seines Aktivitätsmusters bei unterschiedlichen Kognitionsaufgaben die Beteiligung des Precuneus am episodischen Gedächtnis und räumlich-visueller Vorstellungskraft. Zudem assoziieren sie Aktivierung im Precuneus mit Bewusstsein und *self-processing*. Das episodische Gedächtnis ermöglicht das Speichern und Abrufen persönlich erlebter Ereignisse. Die räumlich-visuelle Vorstellungskraft ermöglicht Körperbewegungen im Raum, die willentliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit sowie das Nachdenken über und Lösen von Aufgaben, die eine abstrakte bildliche Vorstellung verlangen. Das Bewusstsein ermöglicht Selbstwahrnehmung sowie bewusstes Wahrnehmen und Erleben der Umwelt. *Self-processing* ermöglicht die Differenzierung zwischen dem Selbst und anderen sowie eine *sense of agency*, d. h. das Wissen, dass eine Handlung immer von einer Person ausgeht. Diese Teilfunktionen des Precuneus scheinen Informationen für das Erkennen von mentalen Zuständen zu verarbeiten.

Temporo-parietale Junktion (TPJ)

Die temporo-parietale Junktion (TPJ) umfasst die Brodmann Areale 22, 39 und 40. TPJ Aktivierungen wurden in zahlreichen, unterschiedlichen Studien zur

ToM beobachtet. Es scheint festzustehen, dass die TPJ-Aktivierung unabhängig von der Art der Stimuli ist: Ob Probanden die mentalen Zustände einer Person in einem Comic (z. B. Ciaramidaro et al. 2007; Gallagher et al. 2000; Sommer et al. 2007; Völlm et al. 2006), einem Video (z. B. Grèzes et al. 2004 a, b) oder einer Kurzgeschichte (z. B. Gallagher et al. 2000; Gobbini et al. 2007; Hynes et al. 2006; Mitchell 2008; Saxe und Kanwisher 2003) erkennen sollten, die TPJ zeigte jedes Mal Aktivierungen.

Die TPJ-Aktivierung scheint auch unabhängig von der Art des mentalen Zustandes zu sein. In einer Reihe von Studien fanden Saxe und ihre Arbeitsgruppe heraus, dass die TPJ unabhängig vom zu erkennendem mentalen Zustand gleichbleibend Aktivierung in ToM-Aufgaben zeigte. Hierbei wurde in einer Studie die Aktivierung der Hirnareale beim Durchlesen von Kurzgeschichten verglichen, die entweder auf das Erkennen von Überzeugungen und Wünschen oder auf Beschreibungen von Handlungen und physikalischen Kausalitäten basierten (Saxe und Kanwisher 2003). Beim Durchlesen der ToM-Kurzgeschichten wurde Aktivierung in der TPJ gefunden. Eine weitere Studie konfrontierte Probanden mit den Wünschen von fiktiven Personen mit vertrauter, westlicher Herkunft und fremder Herkunft (Saxe und Wexler 2005). Nachdem die Probanden die Informationen zu der fiktiven Person durchgelesen hatten, sollten sie entscheiden, wie sich die Personen in Abhängigkeit ihrer in Erfüllung gegangenen oder unerfüllten Wünsche fühlen. Die TPJ zeigte auch bei diesen Probanden beim Erkennen der Gefühle Aktivierung. Stimmten die Wünsche der fiktiven Personen nicht mit den Annahmen der Probanden, die aufgrund der Informationen zur Herkunft der Personen ein bestimmtes Verhalten erwarteten, überein, nahm die Aktivität in der TPJ sogar noch zu. In einer dritten Studie sollten Probanden sich die Gedanken einer Person durchlesen und die daraus folgende Überzeugung der Person nachvollziehen (Saxe und Powell 2006 a). Wie in den beiden vorherigen Studien beobachteten Saxe und ihre Arbeitsgruppe auch hier eine Aktivierung in der TPJ.

Die TPJ scheint jedoch nicht nur an ToM, sondern darüber hinaus an vielen weiteren Funktionen beteiligt zu sein. So zeigt die TPJ auch Aktivierung bei Aufgaben zu *sense of agency*, d. h. dem Wissen, dass eine Handlung immer

von einer Person ausgeht, und zu *action attribution*, d. h. dem Erkennen, ob man selbst oder jemand anderes eine Handlung ausführt. In einer Studie von Ruby und Decety (2001) zeigte die TPJ stärkere Aktivierung, wenn die Probanden sich vorstellen sollten, wie eine Person eine Handlung ausführt, als wenn sie sich vorstellen, die gleiche Handlung selbst durchzuführen. In zwei weiteren Studien sollten Probanden mit einem Joystick Bewegungen durchführen (Farrer und Frith 2002; Farrer et al. 2003). Die Probanden sahen ihre eigenen oder von einem Computer ausgeführte Bewegungen auf einem Bildschirm. Eine erhöhte Aktivierung in der TPJ wurde beobachtet, wenn die Probanden entschieden, dass die beobachteten Bewegungen von jemand anderem und nicht von ihnen durchgeführt wurden.

Die Beteiligung der TPJ an der Unterscheidung zwischen dem Selbst und jemand anderem wird auch durch die *out-of-body-experience* bekräftigt. Mit der *out-of-body-experience* ist das Gefühl gemeint, sich nicht mehr im eigenen Körper zu befinden, sondern sich von außen zu betrachten. Die *out-of-body-experience* kann durch elektrische Stimulation der rechten TPJ ausgelöst werden (Blanke und Arzy 2005). Dasselbe Phänomen wurde bei einem Tinnituspatienten mit einer implantierten Elektrode in der rechten TPJ beobachtet. Anstatt den Tinnitus zu heilen, führte die Stimulation der rechten TPJ zu einer *out-of-body-experience* (De Ridder et al., 2007). Blanke und Arzy (2005) schließen aus diesen Beobachtungen, dass die rechte TPJ für die Integration multisensorischer Informationen verantwortlich ist, die zur Wahrnehmung von Körperteilen und des Körpers als Ganzes führen.

TPJ-Aktivität wurde zudem auch bei *attention reorienting*-Aufgaben beobachtet, bei denen die Aufmerksamkeit auf eine unerwartete, aber für das weitere Verhalten entscheidende Veränderung gerichtet werden muss. So war in einer Studie von Mitchell (2008) die rechte TPJ aktiv beim Erscheinen eines Objektes an einer anderen als der von den Probanden erwarteten Stelle. Die Beteiligung der TPJ an Prozessen zur Aufmerksamkeit scheint durch Filter beeinflusst zu werden. Shulman et al. (2007) beobachteten, dass jegliche auffallende Veränderung in visuellen Stimuli zu Aktivierung in der TPJ führte, wenn Probanden ohne eine spezifische Aufgabe lediglich eine Gruppe von Objekten beobachte-

ten. Sobald sich die Probanden allerdings auf ein bestimmtes Objekt konzentrieren sollten, führten Veränderungen innerhalb der Gruppe von Objekten zu einer Deaktivierung der TPJ. Die Deaktivierung der TPJ scheint daher externe, zur Durchführung der Aufgabe irrelevante Informationen zu filtern, um zu verhindern, dass die Aufmerksamkeit auf unwichtige Objekte gelenkt wird (Shulman et al. 2007).

Die TPJ scheint auch an der Kontrolle von Beobachtungen beteiligt zu sein, die auf physikalischen Grundsätzen beruhen. Die TPJ ist nämlich aktiv, wenn die Erwartungen über eindeutig auf physikalischen Grundsätzen beruhende Ereignisse nicht zutreffen (Decety und Lamm 2007).

In einer Metastudie gingen Decety und Lamm (2007) der Frage nach, ob die unterschiedlichen Funktionen, an denen die TPJ beteiligt ist, alle zu Aktivität in der gleichen TPJ-Region oder in räumlich voneinander getrennten Regionen führen. Dazu verglichen Decety und Lamm (2007) die Aktivitätspeaks in der rechten TPJ von 70 Studien miteinander. 18 Studien befassten sich mit *attention reorienting*, 15 Studien mit *sense of agency* und 37 Studien mit ToM (die Autoren untersuchten das Erkennen von Emotionen als eigene Funktion, was in der vorliegenden Arbeit als Teil der ToM angesehen wird). Sie fanden signifikante Überlappungen der Aktivitätspeaks in der rechten TPJ, wobei die Überlappungen der Aktivitätspeaks für *attention reorienting* und ToM am größten waren. Zudem lagen die Aktivitätspeaks von *sense of agency* und *attention reorienting* weiter dorsal als die bei der ToM gefundenen Peaks. Mitchell (2008) verglich direkt *attention reorienting* und ToM miteinander. Beim Entdecken eines unerwarteten Signals und das Erkennen von Überzeugungen zeigten die Probanden der Studie überlappende Aktivierung in der rechten TPJ.

Die vielfältigen Funktionen der TPJ spiegeln sich auch in ihren Verbindungen zu anderen Hirnarealen wider. Die TPJ ist ein „heteromodaler Assoziationskortex“ (Decety und Lamm 2007): Sie erhält Informationen vom lateralen und posterioren Thalamus, somästhetischen (die Körperwahrnehmung betreffenden), visuellen, auditorischen und limbischen Arealen. Zusätzlich besteht eine afferente und efferente Verbindung zum präfrontalen Kortex und den Poli temporales.

Medialer präfrontaler Kortex (MPFC)

Der mediale präfrontale Kortex (MPFC) umfasst anatomisch die Brodmann Areale 9, 10, 11, 14, 24, 25 und 32. Der MPFC kann anatomisch in drei funktionale Abschnitte eingeteilt werden (Amodio und Frith 2006). In den am weitesten ventral gelegenen Abschnitt, den orbitalen medialen Frontalkortex (MFC), und in den am weitesten dorsal gelegenen Abschnitt, den posterioren rostralen MFC. Das dritte Areal, der anteriore rostrale MFC, liegt zwischen dem orbitalen und posterior rostralen MFC (**Abb. 5**).

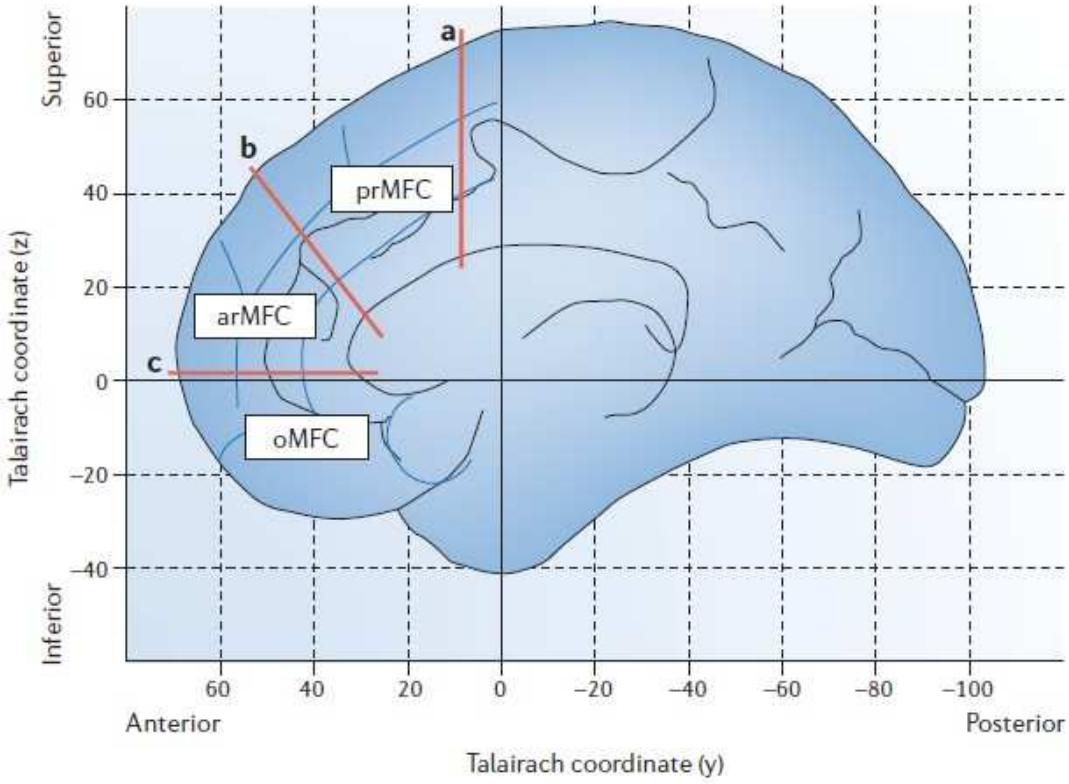

Abb. 5: Anatomische Aufteilung des MPFC in drei funktionale Abschnitte: Die Linie **a** zeigt die Grenze zwischen dem posterioren rostralen medialen Frontalkortex (prMFC) und dem caudalen MFC, Linie **b** die Grenze zwischen dem anterioren rostralen MFC (arMFC) und dem posterioren rostralen MFC und Linie **c** die Grenze zwischen dem orbitalen MFC (oMFC) und dem anterioren rostralen MFC. Aus: Amodio und Frith (2006)

Der orbitale MFC scheint am *outcome monitoring* beteiligt zu sein (Amodio und Frith, 2006). Dabei bewertet der orbitale MFC ständig von Neuem den Nutzen eines möglichen zukünftigen Resultats.

Der posteriore rostrale MFC wird mit *action monitoring* in Verbindung gebracht (Amodio und Frith 2006). Es scheint eine dem orbitalen MFC ähnliche Aufgabe wahrzunehmen: Im posterior rostralen MFC wird eine mögliche Handlung repräsentiert, deren Nutzen ständig abgeschätzt wird. Das Abwägen, ob eine Handlung und die daraus resultierenden Folgen von Nutzen sind, ist an der Regulierung unseres Verhaltens beteiligt.

Der anterior rostrale MFC scheint an der Wahrnehmung und der Beurteilung von Menschen (*person perception*) sowie an *self-knowledge* beteiligt zu sein (Amodio und Frith 2006). *Self-knowledge* bezeichnet die Fähigkeit, sich selbst von anderen Personen oder Objekten zu differenzieren und auf die eigene Person zutreffende Eigenschaften sowie Vorlieben zu erkennen. Beinahe durchgehend zeigt der anterior rostrale MFC Aktivierung in Studien zu der ToM. Die Aktivierung ist dabei besonders im paracingulären Kortex lokalisiert (Amodio und Frith 2006). Diese Region scheint stärker beim Erkennen der Emotionen als beim Erkennen der Intentionen oder Gedanken einer anderen Person aktiv zu sein (Hynes et al. 2006; Shamay-Tsoory et al. 2007; Völlm et al. 2006).

Der MPFC ist jedoch nicht nur beim Erkennen von mentalen Zuständen anderer Personen aktiv, sondern auch, wenn wir über unseren eigenen mentalen Zustand nachdenken (Gusnard et al. 2001; Lane et al. 1997; Mitchell et al. 2005; Ochsner et al. 2004). Frith und Frith (2006) gehen daher davon aus, dass der anterior rostrale MFC bei der Voraussage des Verhaltens einer Person, die einem selbst sehr ähnlich ist, stärker aktiv ist als bei einer Person, die keine Ähnlichkeiten mit einem selbst hat. Zudem sei das Erkennen von Emotionen einer anderen Person eher mit Bezug auf einen selbst verbunden als das Erkennen von Gedanken und Intentionen.

Lobus parietalis superior (SPL)

Die Lobus parietalis superior (SPL) umfasst die Brodmann Areale 4, 5 und 7. Als ein mit kognitiver Kontrolle assoziiertes Hirnareal zeigte der SPL Aktivierung bei Aufgaben, in denen Aufmerksamkeit in unterschiedlichen sensorischen Bereichen neu ausgerichtet werden musste (Kelley et al. 2008, Liu et al. 2003, Serences et al. 2004, Shomstein und Yantis 2004, Vandenberghe et al. 2001, Yantis et al. 2002). So mussten in zwei aktuellen Studien Probanden ihre räumlich visuelle Aufmerksamkeit sowie ihre Aufmerksamkeit im Arbeitsgedächtnis neu ausrichten und Kategorisierungsregeln wechseln (Chiu und Yantis 2009, Esterman et al. 2009). Hierbei war die Aktivierung des SPL zeitlich auf die Initiierung des Aufmerksamkeitswechsels beschränkt, weshalb Esterman et al. (2009) eher von einer Beteiligung des SPL an der Rekonfiguration der Aufmerksamkeit als am Erhalt der Aufmerksamkeit ausgehen. Aktivierung im SPL wurde auch in einer Studie beobachtet, in der durch Reizung der Sehnen der Extensoren und Flexoren der rechten und linken Hand den Probanden vorgetäuscht wurde, dass sich ein Zylinder zwischen ihren Händen in der Länge veränderte (Naito et al. 2008). Die Autoren schlossen aus diesen Beobachtungen auf eine Integration von Informationen über die relative räumliche Lage beider Arme zueinander und von Informationen über die Form und Größe eines mit beiden Händen gehaltenen Objekts im SPL (Naito et al. 2008).

Der SPL wurde bisher noch nicht mit der Verarbeitung von ToM-Aufgaben assoziiert.

Amygdala

Die Amygdala umfasst die Brodmann Areale 27, 28, 34, 35 und 36. Aktivierungen der Amygdala wurden in Studien beobachtet, in denen Probanden mit emotionalen Gesichtsausdrücken so genannter *basic emotions* (Freude, Angst, Ärger, Traurigkeit und Ekel) konfrontiert wurden (Blair et al. 1999; Breiter et al. 1996; Morris et al. 1996, Philipps et al. 1998). Darüber hinaus scheint die Amygdala soziale Informationen aus Gesichtern auch zur komplexeren sozialen Beurteilung zu nutzen. So beobachteten Winston et al. (2002) Aktivierung in der

Amygdala, wenn Probanden ihnen präsentierte Gesichter als nicht vertrauenswürdig einschätzten, und Phelps et al. (2000) berichteten von Amygdala-Aktivierung, wenn Probanden mit Gesichtern von Personen anderer Rassen konfrontiert wurden. Die Amygdala scheint durch Ausrichtung der Aufmerksamkeit und der Blickrichtung auf bestimmte Abschnitte eines Gesichts beim Erkennen von hervorstechenden sozialen Informationen beteiligt zu sein (Adolphs, 2006). Adolphs (2006) schließt nicht aus, dass die Amygdala nicht nur aus einem Gesicht Informationen erlangt, sondern allgemein durch Erkundung einer sozialen Umgebung, da die Amygdala dem Erkennen von potenziell wichtiger Stimuli dient, zu denen nähere Informationen nötig sind.

1.3 Magnetresonanztomografie (MRT)

Zur Darstellung des Gehirns werden geeignete Bildgebungsverfahren benötigt, die nicht-invasiv sind und einen differenzierten Einblick in die Anatomie des Gehirns gewähren. Dabei haben sich die Computertomografie (CT) und vor allem die Magnetresonanztomografie (MRT) als führende Schnittbildverfahren etabliert. Während in der medizinischen Diagnostik je nach Fragestellung beide Verfahren zur Darstellung des Gehirns zur Anwendung kommen, wird in der neurowissenschaftlichen Forschung aufgrund der fehlenden Strahlenbelastung hauptsächlich die MRT verwendet. Die MRT ermöglicht dabei nicht nur die sehr detaillierte anatomische Erfassung von Hirnarealen, sondern kann mithilfe von funktionellen Aufnahmen (fMRT) indirekt über die Veränderung des regionalen Blutflusses auch eine Aktivierung funktioneller Hirnareale anzeigen. Die physikalischen und technischen Grundlagen der MRT liegen nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, daher geben die folgenden Abschnitte nur einen groben Überblick über die MRT und funktionelle MRT. Eine detailliertere Darstellung hierzu findet man z. B. bei Reiser und Semmler (2002) und bei Logothetis und Wandell (2004).

Technische Grundlagen

Mit dem Phänomen der *kernmagnetischen Resonanz* (vereinfacht: Magnetresonanz) kann die Auswirkung von Radiofrequenzimpulsen auf die elektromagnetischen Dipole einzelner Atome, insbesondere von Wasserstoffkernen, in einem statischen magnetischen Feld (B_0) erfasst werden. Zusammen mit der Anwendung von zusätzlich geschalteten lokalen Magnetfeldern (sogenannten Gradienten) kann auf diese Weise ein Bild erzeugt werden. Im Gehirn beruht das Magnetresonanzsignal (MR-Signal) hauptsächlich auf Protonen aus Wasserstoffatomen. Wird ein Proband in das Magnetfeld B_0 des MRT-Scanners gebracht, nehmen die Protonen einen organisierten, am Magnetfeld ausgerichteten Zustand an. Die Magnetfeldstärke der MRT-Scanner liegt in der Regel zwischen 1,5 und 4,7 Tesla (T).

Die Messung im MRT-Scanner beginnt mit einem zur Magnetfeldstärke und zur gyromagnetischen Konstante des Protons proportionalem Hochfrequenzpuls, der die Protonen im zu messenden Gewebe anregt und sie in einen höheren Energiezustand versetzt. Nach Anregung der Protonen kommt es zur Relaxation: Die Protonen fallen wieder in den Ausgangszustand niedriger Energie zurück und strahlen dabei elektromagnetische Wellen aus. Die Rückkehr in den ursprünglichen Energiezustand kann durch zwei Exponentialfunktionen mit den Zeitkonstanten T1 und T2 beschrieben werden. Die T1-Konstante gibt die longitudinale Relaxation der Protonen in Richtung des Magnetfeldes B_0 wider. Die zum Magnetfeld senkrechte Relaxation der Protonen wird von der T2-Konstante erfasst. Hierbei treten im Gewebe lokale Inhomogenitäten des Magnetfeldes auf, die zu einer schnelleren Abnahme der senkrechten Relaxation führen, als es die T2-Konstante beschreibt. Dieses schnell abfallende Signal wird daher als T2*-Konstante beschrieben und bildet die Grundlage für die funktionelle MRT.

Das so erzeugte MR-Signal wird von Empfängerspulen gemessen, die so nah wie möglich am zu messenden Gewebe platziert werden. Das MR-Signal ist abhängig von der Protonendichte und den genannten Relaxationszeiten des untersuchten Gewebes. Durch eine geeignete Wahl des Hochfrequenzpulses und wechselnde Stärken des Gradienten kann eine Ortskodierung erreicht werden, die anschließend zu einem Schichtbild des untersuchten Gewebes zu-

sammengesetzt wird. Die räumliche Verteilung der Protonen im Gewebe wird in den einzelnen Schichtbildern durch Grauwertabstufungen dargestellt, wodurch das gemessene Gewebe visualisiert wird. Durch die Wichtung der Schichtbilder aufgrund unterschiedlicher Protonendichte und T1- und T2-Konstanten werden Gewebeanteile in verschiedenen Grauwertabstufungen dargestellt, was für die medizinische Diagnostik ausgenutzt wird. Die so erstellten Schichtbilder eines Gehirns ermöglichen die Unterscheidung einzelner anatomischer Strukturen sowie die Erfassung pathologischer Veränderungen. Eine Abgrenzung funktioneller Hirnareale ist mit dem beschriebenen MRT-Verfahren jedoch nicht möglich. Im folgenden Abschnitt wird eine spezielle Variante der Magnetresonanztomografie, die Erfassung von funktionell aktivierten Hirnarealen mittels funktioneller Magnetresonanztomografie, beschrieben.

1.3.1 Funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT)

Zur Erfassung von funktionell aktivierten Hirnarealen mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) werden T2*-gewichtete Schichtbilder benötigt, welche die regionalen Blutflussveränderungen beim Ausführen von sensorischen Reizen oder speziellen Aufgaben anzeigen. Diese funktionellen Bilder werden anschließend auf mittels struktureller Magnetresonanztomografie erstellten T1- oder T2-gewichteten Schichtbildern überlagert, um ihre anatomische Lokalisation im Gehirn zu bestimmen (**siehe 1.3**).

Physiologische Grundlagen

Die Reizverarbeitung im Gehirn erfolgt durch elektrische Signale, die von aktivierten Neuronen ausgehen. Eine direkte, nicht-invasive Messung dieser Signale ist mit der Elektroenzephalografie (EEG) und der Magnetenzephalografie (MEG) möglich (Berne und Levy 1993). Die funktionelle Magnetresonanztomografie misst nicht die elektrischen Signale aktiver Neurone, sondern vielmehr eine Folge der neuronalen Aktivierung. Mit der neuronalen Aktivierung geht ein vermehrter Einstrom von oxygeniertem Blut in dem betroffenen Hirnareal ein-

her, der gemessen werden kann, da es dabei zu einer regionalen Zunahme der Sauerstoffkonzentration im Blut kommt. Ogawa et al. (1990 a, b) und Turner et al. (1991) konnten in Studien zeigen, dass das MR-Signal in der Nähe von Blutgefässen und in durchbluteten Hirnarealen abnimmt, wenn die Oxygenierung des Blutes abnimmt.

Werden Neurone aktiv, steigt ihr Energieverbrauch aufgrund von Membran-Repolarisierungen und der Synthese von Neurotransmittern. Der erhöhte Energieverbrauch führt zu einer regionalen Erhöhung des Blutflusses (*cerebral blood flow*, CBF) und des Blutvolumens (*cerebral blood volume*, CBV) (Logothetis 2002; Logothetis und Wandell 2004). Durch den erhöhten Blutfluss nimmt die Versorgung mit oxygeniertem Hämoglobin so weit zu, dass das aktive Hirnareal mit Sauerstoff überversorgt wird. Der Anteil an deoxygeniertem Hämoglobin sinkt dementsprechend ab (Fox und Raichle 1986; Logothetis und Wandell 2004). Diese Konzentrationsänderungen an oxygeniertem und deoxygeniertem Hämoglobin beeinflussen das lokale MR-Signal, weil die Sauerstoffanlagerung eine Veränderung der Elektronenkonfiguration des Eisenatoms im Hämoglobin bewirkt. Das Eisenatom bleibt zwar als zweiwertiges Atom im Hämoglobin gebunden, verändert jedoch seine magnetischen Eigenschaften. Während das diamagnetische oxygenierte Hämoglobin nur einen geringen Einfluss auf das regionale Magnetfeld hat, führt das paramagnetische deoxygenierte Hämoglobin durch eine Störung des regionalen Magnetfeldes zu einer Abnahme der T2*-Konstanten und damit der Signalintensität (Ogawa et al. 1990 a, b). Die Konzentrationszunahme des oxygenierten Hämoglobins in einem aktivierten Hirnareal verringert somit die lokalen Inhomogenitäten im Magnetfeld. Die Folge dieser hämodynamischen Antwort ist ein etwas stärkeres MR-Signal in aktivierten Hirnarealen im Vergleich zu einer Ruhemessung. Dieser Effekt wurde daher auch als *blood oxygen level dependent* (BOLD)-Effekt bezeichnet und ermöglicht die Darstellung funktionell aktiver Hirnareale mittels fMRT.

1.3.2 Hämodynamische Antwort

Die Präsentation eines Stimulus führt umgehend zur Aktivierung der zuständigen Neuronen. Dieser Vorgang führt zu einem höheren Bedarf von mit dem Blut angelieferten Sauerstoff (**siehe 1.3.1**). Da unmittelbar nach Präsentation eines Stimulus die Sauerstoffkonzentration erst mit einer Verzögerung von 0,5 s ansteigt, kommt es zu einer sehr kurzen regionalen Abnahme der Signalintensität. Diese Ursache dieser als *initial dip* bezeichneten Abnahme ist allerdings noch nicht vollständig geklärt. Anschließend kommt es mit Zunahme der Sauerstoffzufuhr zu einer Signalzunahme (Malonek et al. 1996; Malonek et al. 1997; Menon et al. 1995), die nach etwa 5-6 s ihr Maximum erreicht. Danach nimmt die BOLD-Signalintensität wieder ab und erreicht nach etwa 20 s wieder ihren Ausgangswert. Der letzte Teil der Signalkurve kann dabei auch als poststimulativer *undershot* unter den Ausgangswert sinken (Fransson et al. 1998; Janz et al. 1997). Diese charakteristische Form der BOLD-Antwort kann mit einer an den tatsächlichen Verlauf der BOLD-Kurve angepassten Funktion, der sogenannten *hemodynamic response function* (HRF) (Friston et al. 1998) (**Abb. 6**), beschrieben werden und ermöglicht als allgemeine Annäherung an den tatsächlichen lokalen Verlauf der BOLD-Antwort die Auswertung von Stimulationsexperimenten.

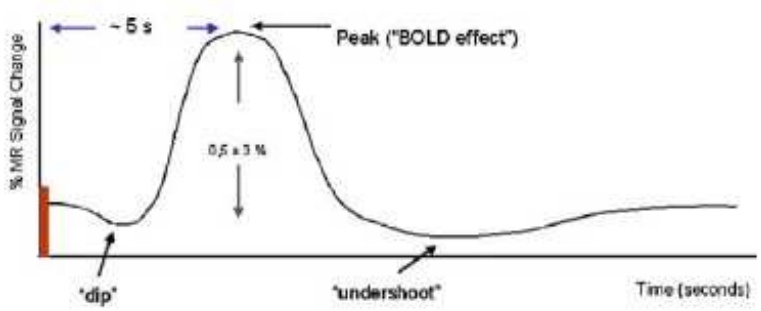

Abb. 6: *Hemodynamic response function* (HRF): Annäherung an den tatsächlichen Verlauf der BOLD-Antwort auf einen Stimulus. Aus: Amaro und Barker (2006)

1.3.3 Gestaltung eines fMRT-Experiments

Für die Gestaltung eines fMRT-Experiments kommen üblicherweise zwei Möglichkeiten in Frage, die im Folgenden näher erläutert werden.

Blockdesign

Das Blockdesign stellt einen Versuchsaufbau dar, in dem eine Aufgabe in Blöcken definierter Dauer abwechselnd mit Ruheperioden präsentiert wird. Der Wechsel zwischen Aufgaben- und Ruheblöcken ermöglicht eine Differenzierung zwischen den beiden Bedingungen, da das Gehirn wiederholt während des Aufgabenblocks aktiv ist und während der Ruheblöcke in die Grundaktivität zurückfällt. Das bei der Durchführung der Aufgabe entstehende BOLD-Signal wird während den Aufgabenblöcken aufgrund der meistens schnell aufeinanderfolgenden Aufgabenwiederholung maximiert und während den Ruhephasen minimiert. Dadurch wird der Signalunterschied der Hirnaktivierung zwischen den beiden Bedingungen verstärkt.

Die Ruhebedingungen können auch Kontrollbedingungen sein, die eine Aufgabe enthalten, welche nicht zur Aktivierung derselben Hirnareale führt, die bei der untersuchten Aufgabe aktiv sind.

Eine sehr häufig gebrauchte Funktion zur Darstellung der Signalunterschiede im Blockdesign ist eine *box-car*. Für die *box-car*-Funktion wird die Ruhe- bzw. Kontrollbedingung mit einer Null und die untersuchte Aufgabe mit einer Eins kodiert. Doch die Hirnareale sind nicht plötzlich aktiv und dann wieder inaktiv, wie es die *box-car*-Funktion beschreibt, sondern das BOLD-Signal erreicht erst 5-6 s nach dem Stimulus ein Maximum und weist am Blockende einen *undershot* auf (**siehe 1.3.2**). Eine geeignetere Annäherung an das tatsächliche BOLD-Signal im Blockdesign erreicht man erst durch die Einbindung der HRF (**siehe 1.3.2**) in die *box-car*-Funktion.

Event-related Design

Ein *event-related* Design kommt zur Anwendung, wenn man das BOLD-Signal für ein Einzelereignis messen möchte. Wenn zwei Stimuli kurz nacheinander präsentiert werden, kommt es zur Überlappung der BOLD-Kurven. Wie sich die einzelnen BOLD-Kurven aufaddieren, hängt zum einen vom Zeitabstand zwischen den Stimuli und zum anderen von der Anzahl aufeinanderfolgender Stimuli ab. Folgen nämlich viele Stimuli in kurzen Zeitabständen aufeinander, ist ein Auftrennen der BOLD-Kurven nicht mehr möglich. Die optimale Frequenz für ein *event-related* Design liegt bei einem festen Stimulusabstand von 0,05-0,08 Hz (Bandettini und Cox 2000). Dies entspricht einem Stimulusabstand von 12-20 s. Diese Ruhepause zwischen den Stimuli ermöglicht ein Absinken der Hirnaktivität zurück auf den Ruhewert, wodurch es nicht zur Aufaddierung der BOLD-Kurven kommt.

1.3.4 Echoplanartechnik

Die Möglichkeiten der fMRT können erst vollständig ausgenutzt werden, wenn schnelle Gradientenschaltungen und eine spezielle Bildaufnahmetechnik angewandt werden, mit der mehrere Bilder während der Zeitspanne der hämodynamischen Antwort, d. h. innerhalb von 3-5 s, abgetastet werden kann. Längere Messzeiten führen nämlich aufgrund willkürlicher und unwillkürlicher Kopfbewegungen, sowie durch Atmung und Herzkontraktionen bedingte Gehirnpulsationen zu starken Bewegungsartefakten. Diese Bewegungsartefakte lassen sich durch eine schnelle Messsequenz vermindern. Eine so schnelle Bildgebung ist nur mit einer speziellen Messtechnik, der sogenannten Echo planar Bildgebung, möglich. Das *Echo-Planar-Imaging* (EPI) wurde erstmals von Mansfield (1977) beschrieben und ermöglicht mit einer einzelnen Anregung, dem sogenannten *singel shot*, die Aufnahme einer Schicht des Gehirns in weniger als 0,1 s, sodass für die Abtastung des gesamten Gehirns nur wenige Sekunden notwendig sind. Die EPI-Sequenz erlaubt somit die Akquisition großer Datenmengen innerhalb weniger Minuten. Zur effektiveren Bearbeitung der

enormen Datenmengen werden oft mehrere Bilder in einer neuen Bilddarstellung, ähnlich eines Mosaiks, zusammengefasst (Klose et al. 1999).

1.4 Ziel der vorliegenden Untersuchung

Ein Blick auf die zahlreichen Studien zu der ToM zeigt, dass sich beinahe alle Studien auf die Prozesse beim Erkennen eines mentalen Zustandes konzentrieren. Dabei wurden dem Erkennen von Überzeugungen (z. B. Gallagher et al. 2000; Saxe und Kanwisher 2003; Sommer et al. 2007) und dem Erkennen von Intentionen (z. B. Brunet et al. 2000; Ciaramidaro et al. 2007; Walter et al. 2004) die größte Aufmerksamkeit geschenkt. Die Ergebnisse dieser Studien lieferten eine Reihe von Erkenntnissen über die beim Erkennen eines bestimmten mentalen Zustandes beteiligten Hirnareale (**siehe 1.2.3**). Dabei kristallisierten sich die TPJ und der MPFC als die am häufigsten an der ToM beteiligten Hirnareale heraus.

Die vorliegende Arbeit untersucht am Beispiel der Intentions- und Emotionserkennung, welche Hirnareale nur bei einen von zwei unterschiedlichen mentalen Zuständen aktiv sind und welche Areale für beide ToM-Bedingungen rekrutiert werden und somit auf eine vom mentalen Zustand unabhängige Beteiligung an der ToM hinweisen. Im Besonderen geht die vorliegende Arbeit der Frage nach, wie die TPJ an der ToM beteiligt ist.

1.4.1 Vergleich der Hirnaktivität beim Erkennen zweier unterschiedlicher mentaler Zustände

Nach Durchsicht der Literatur fanden sich nur zwei Studien mit einem Vergleich der am Erkennen zweier unterschiedlicher mentaler Zustände beteiligten Hirnarealen (Hynes et al. 2006; Völlm et al. 2006).

Das Erkennen von Emotionen und Gedanken einer Person aus einer Kurzgeschichte (Hynes et al. 2006) führte zu einem gemischten Ergebnis: Während das Erkennen von Emotionen im Vergleich zu Gedanken hauptsächlich eine mediale orbitofrontale Kortex Aktivierung zeigte, wurden beim Erkennen der

Gedanken im Vergleich zu Emotionen eher anteriore und laterale Regionen des ventralen Frontallappens rekrutiert. Zwei Areale zeigten ein ähnliches Aktivitätsmuster für beide mentalen Zustände: die TPJ und der MPFC. Die MPFC-Aktivität lag jedoch nicht in dem in der vorliegenden Arbeit definierten ROI für den MPFC (**siehe Anhang 1**).

Ein gemischtes Ergebnis zeigte sich auch beim Erkennen von Intentionen und Emotionen in Comics (Völlm et al. 2006): Beim Erkennen von Intentionen im Vergleich zu Emotionen waren hauptsächlich der laterale orbitofrontale Kortex, der Gyrus frontalis medius und der STS aktiv. Das Erkennen von Emotionen im Vergleich zu Intentionen zeigte dagegen hauptsächlich Aktivierung in der Amygdala, im Cingulum sowie im MPFC. Auch in dieser Studie fanden sich sowohl für das Erkennen von Intentionen als auch Emotionen Aktivierungen in der TPJ und im MPFC. Die Aktivierung im MPFC lag jedoch wieder nicht in dem Bereich, der in der vorliegenden Arbeit definiert ist (**siehe Anhang 1**).

1.4.2 Aktivierung in der temporo-parietalen Junktion

Während die Beteiligung der TPJ an der ToM mittlerweile unbestritten ist, sind immer noch zwei Fragen ungeklärt: Ist die in ToM-Studien berichtete TPJ-Aktivierung selektiv für ToM? Aus einer solchen selektiven TPJ-Aktivierung für die ToM folgte dann die Frage, ob räumlich voneinander getrennte Regionen innerhalb der TPJ spezifisch für einen mentalen Zustand aktiviert werden.

In einer Reihe von Studien (**siehe 1.2.3**) konnten Saxe und ihre Arbeitsgruppe zeigen, dass die TPJ eine stärkere BOLD-Antwort bei Informationen über einen mentalen Zustand als für andere individuelle Informationen über eine Person aufweist. Damit sieht Saxe (2006 b) die Selektivität der TPJ für die ToM als bewiesen an. In einer Studie zur Klärung der TPJ-Selektivität für die ToM wurden *false belief*- mit *attention reorienting*-Aufgaben (**siehe 1.2.3**) verglichen (Mitchell 2008). Beide Aufgaben weisen eine überlappende Aktivität in der TPJ auf. Mitchell (2008) sieht daher die TPJ nicht als selektiv für die ToM reagierende Region an, sondern vielmehr als eine Region, die an unterschiedlichen Aufgaben mit demselben Verarbeitungsproblem beteiligt ist. Auch Decety und Lamm

(2007) kommen in ihrer Metaanalyse für *attention reorienting*-, *sense of agency*- und ToM-Aufgaben zu dem Schluss, dass die TPJ nicht selektiv für die soziale Kognition aktiviert wird, sondern allgemein an der Verarbeitung dieser Funktionen beteiligt ist (**siehe 1.2.3**).

Eine spezifische TPJ-Aktivität für einen bestimmten mentalen Zustand in räumlich voneinander getrennten Subregionen innerhalb der bei ToM-Aufgaben aktivierten TPJ-Region würde jedoch auf eine Selektivität der TPJ für ToM schließen lassen. Denn Mitchell (2008) sowie Decety und Lamm (2007) berichten zwar von Aktivitätsüberlappungen in der TPJ, doch liegen die Aktivitätsmaxima der verglichenen Aufgaben räumlich voneinander getrennt vor. Innerhalb des Clusters um das Aktivitätsmaximum für ToM könnte es spezialisierte Subregionen geben, die bei einem spezifischen mentalen Zustand aktiv werden.

1.4.3 Das Vorgehen in der vorliegenden Untersuchung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Verarbeitungsprozesse der ToM beim Erkennen von Intentionen und Emotionen und von physikalischen Kausalitäten. Dies soll zum einen Aufschluss darüber geben, welche Hirnareale gemeinsame und welche unterschiedliche Aktivierungen während zweier ToM-Aufgaben zeigen. Zum anderen soll festgestellt werden, ob zwei unterschiedliche ToM-Aufgaben (Erkennen von Intentionen und Emotionen) sowie eine Aufgabe zu physikalischen Kausalitäten dieselbe Subregion oder unterschiedliche Subregionen innerhalb der TPJ aktivieren, was auf eine spezifische Antwort der TPJ auf bestimmte mentale Zustände und eine Selektivität für die ToM hinweisen würde.

Die vorliegende Arbeit verwendet dazu ein einfaches experimentelles Paradigma, dass bereits zur Untersuchung der neuronalen Korrelate für das Erkennen von Intentionen und Emotionen verwendet wurde (Völlm et al. 2006). Dieses Paradigma besteht aus vier Versuchsbedingungen. Zwei Bedingungen erfordern das Erkennen von Intentionen und Emotionen einer Person. In zwei weiteren Bedingungen, in denen keine ToM benötigt wird, müssen physikalische Kausalitäten erkannt und deren Folgen abgeleitet werden.

2 Materialien und Methoden

2.1 Probandenkollektiv

24 Probanden im Alter von 22 bis 28 Jahren (mittleres Alter: 23,6 Jahre) nehmen an der vorliegenden Arbeit teil (**Tab. 2**). Bei den Versuchsteilnehmern handelt es sich um 11 weibliche und 13 männliche rechtshändige Probanden. Alle Probanden sind ohne neurologische oder psychiatrische Erkrankungen in der Anamnese.

Tab. 2: Probandenkollektiv

Probanden gesamt	**24**
davon weiblich	11
davon männlich	13
Alter	**22-28 Jahre**
mittleres Alter	23,6 Jahre

2.1.1 Aufklärung und Vorbereitung

Die Probanden werden allgemein über MRT-Messungen und mögliche Nebenwirkungen aufgeklärt. Nach Ausschluss von Kontraindikationen bezüglich der MRT-Messung werden die Probanden über den Messablauf informiert. Alle Probanden willigen schriftlich zur Teilnahme an der Studie ein.

Die Probanden werden in Rückenlage auf dem Tisch des Magnetresonanztomografen gelagert. Damit sie für die Messzeit bequem liegen und sich möglichst wenig bewegen, erhalten die Probanden eine Knierolle und werden in der Kopfspule mit seitlich eingebrachten kleinen Schaumstoffkissen fixiert. Die Probanden tragen zum Gehörschutz Ohrenstöpsel.

In der rechten Hand halten alle Probanden einen Taster mit vier Tasten. Mit den zwei oberen Tasten können sie ihre Antwort während der Messung auswählen. In die linke Hand bekommen alle Probanden einen Alarmknopf, mit

dem sie die Messung jederzeit unterbrechen können, falls sie sich unwohl fühlen oder andere Probleme auftreten. Zudem werden die Probanden darauf hingewiesen, dass sie zwischen den Messungen über Lautsprecher Instruktionen aus dem Messraum erhalten werden und sie selbst dann auch reden können.

2.1.2 Gerätekomponenten

Die Messungen finden an einem 1,5 T Magnetresonanztomografen (Magnetom Sonata Vision, Siemens, Nürnberg-Erlangen) der Sektion für experimentelle Kernspinresonanz des ZNS am Universitätsklinikum Tübingen statt. Für die Messungen wird eine zirkular polarisierte 8-Kanal Kopfspule verwendet.

2.2 Stimuli

Als Stimuli werden 40 Comics verwendet, die alle eine Kurzgeschichte erzählen. Die Comics wurden ursprünglich von Sarfati et al. (1997) und Brunet et al. (2000) entwickelt und von Völlm et al. (2006) modifiziert.

Für die Projektion im Magnetresonanztomografen werden alle Stimuli zuvor mit einem Kontrastfilter des Bildbearbeitungsprogramms *Paint.Net 2.72* (dotPDN LLC) bearbeitet, um einen besseren Kontrast der Stimuli zu erreichen.

Jeder Comic besteht aus drei Bildern, welche die Kurzgeschichte einleiten, und zwei anschließend gezeigten Bildern, die alternative Ausgangsmöglichkeiten der Kurzgeschichte anzeigen.

2.2.1 Comic Kategorien

Die Comics sind in vier Kategorien mit je 10 Kurzgeschichten eingeteilt. Je zwei Kategorien gehören zu einer *ToM-Bedingung* und zu einer *Nicht-ToM-Bedingung*. Die zwei Kategorien der ToM-Bedingung sind *Intentionserkennung* und *Emotionserkennung*. Das Erkennen *physikalischer Kausalitäten* bildet die zwei Kategorien der Nicht-ToM-Bedingung. Die beiden Kategorien der Nicht-ToM-Bedingung beruhen darauf, dass die aus den Handlungen einer Person

entstehenden Konsequenzen bezüglich ihrer physikalischen Richtigkeit beurteilt werden müssen. Der Unterschied zwischen den ToM- und den Nicht-ToM-Bedingungen liegt in der ihnen zugrunde liegenden, unterschiedlichen Fragestellung. Bei den ToM-Bedingungen steht die Hauptfigur der Comics im Mittelpunkt und es geht um die Frage, was im Inneren der Hauptfigur vorgeht. So muss während der Intentionserkennung der Frage nachgegangen werden, mit welcher Absicht die Hauptfigur eine Handlung durchführt. Welche emotionale Auswirkung eine Handlung auf die Hauptfigur haben könnte, muss während der Emotionserkennung geklärt werden. In beiden Fällen ist es nötig, sich über den mentalen Zustand der Hauptfigur Gedanken zu machen. Im Gegensatz dazu steht bei den Nicht-ToM-Bedingungen die Konsequenz einer Handlung im Mittelpunkt und es geht um die Frage, ob das Geschehen in den Comics möglich ist oder nicht. Dazu muss überprüft werden, ob die Konsequenz einer präsentierten Handlung im Einklang mit physikalischen Grundsätzen steht. Die ToM wird in diesem Fall nicht benötigt. Die Hauptfigur in jedem Comic ist durch violette Kleidung gekennzeichnet.

Intentionserkennung

Die Comics aus der Kategorie Intentionserkennung zeigen eine Comicfigur bei einer Handlung (**Abb. 7**). Die Probanden sollen die Intention der Comicfigur erkennen, um das Ende des Comics auszuwählen, das die richtigen Konsequenzen der Intention der Comicfigur zeigt.

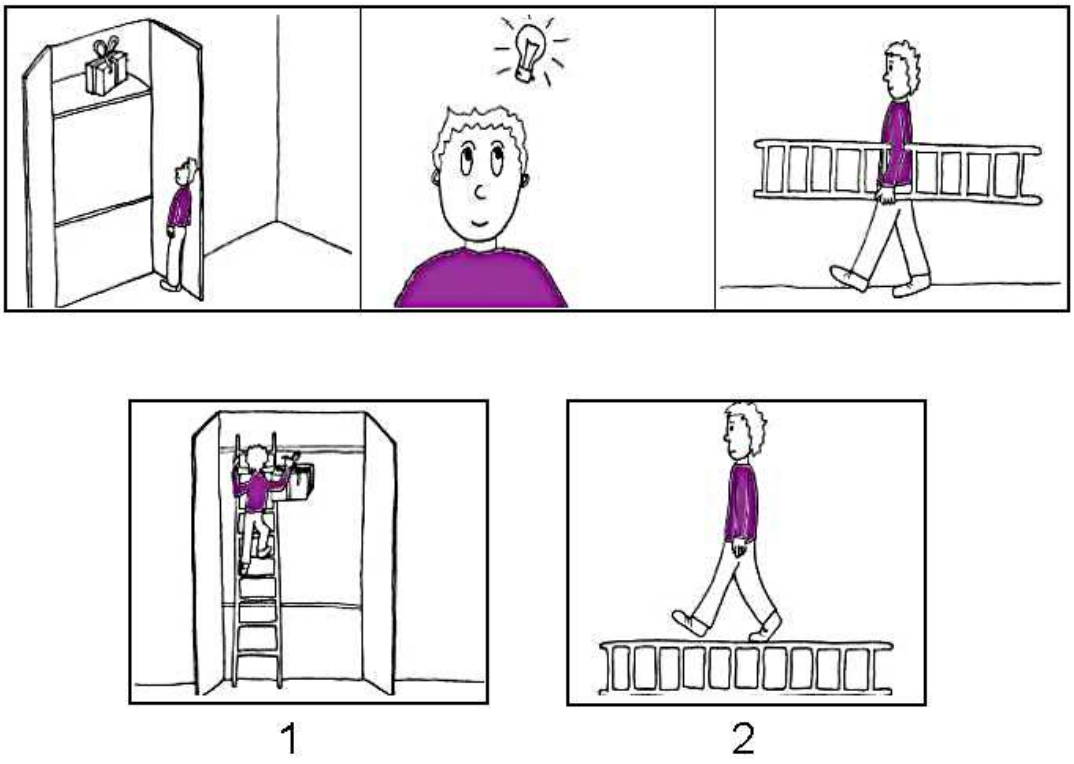

Abb. 7: Comic aus der Kategorie Intentionserkennung

Emotionserkennung

Die Comics aus der Kategorie Emotionserkennung zeigen zwei oder mehrere Comicfiguren bei einer sozialen Interaktion (**Abb. 8**). Die Probanden sollen in dieser Kategorie entscheiden, bei welchem Ende des Comics sich die Hauptfigur besser fühlen wird.

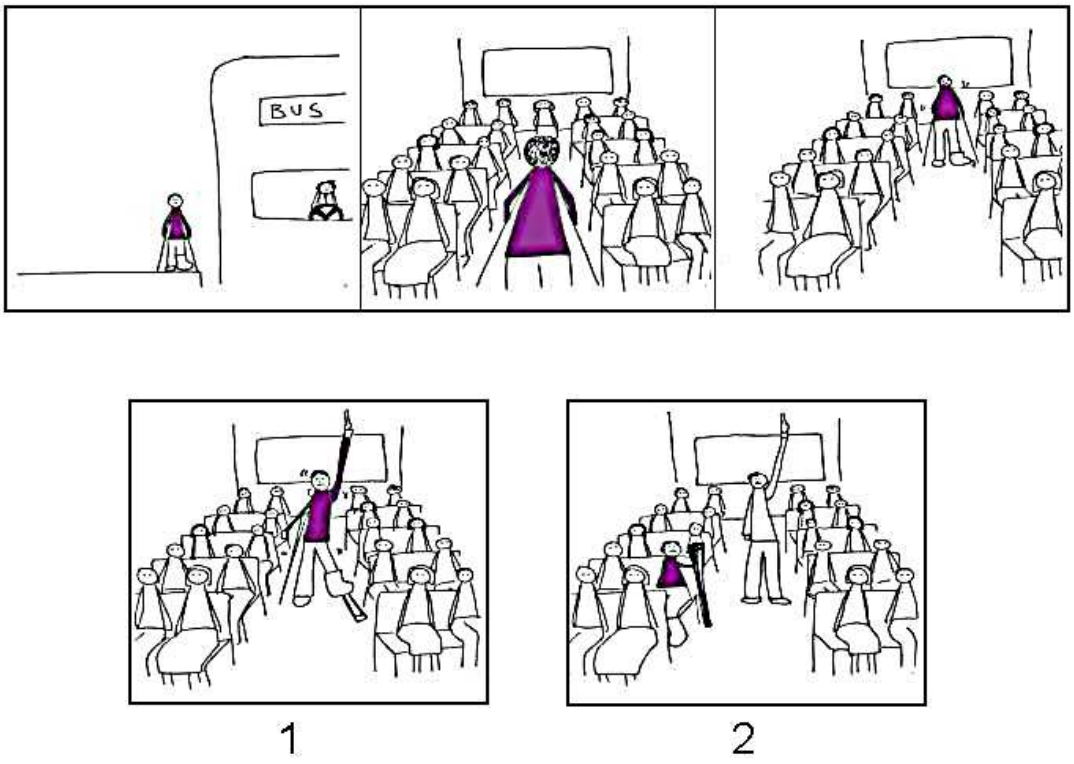

Abb. 8: Comic aus der Kategorie Emotionserkennung

Physikalische Kausalitäten mit einer Person (Phys 1)

Die den Folgen einer Handlung einer Person oder eines Geschehens zugrundeliegenden physikalischen Grundsätze bilden den Inhalt der Comics aus der Kategorie physikalische Kausalitäten (**Abb. 9**). Die Probanden sollen in dieser Kategorie entscheiden, in welchem Comicende die dargestellten Folgen physikalischen Grundsätzen entsprechen. In den Comics kommt immer eine Person vor.

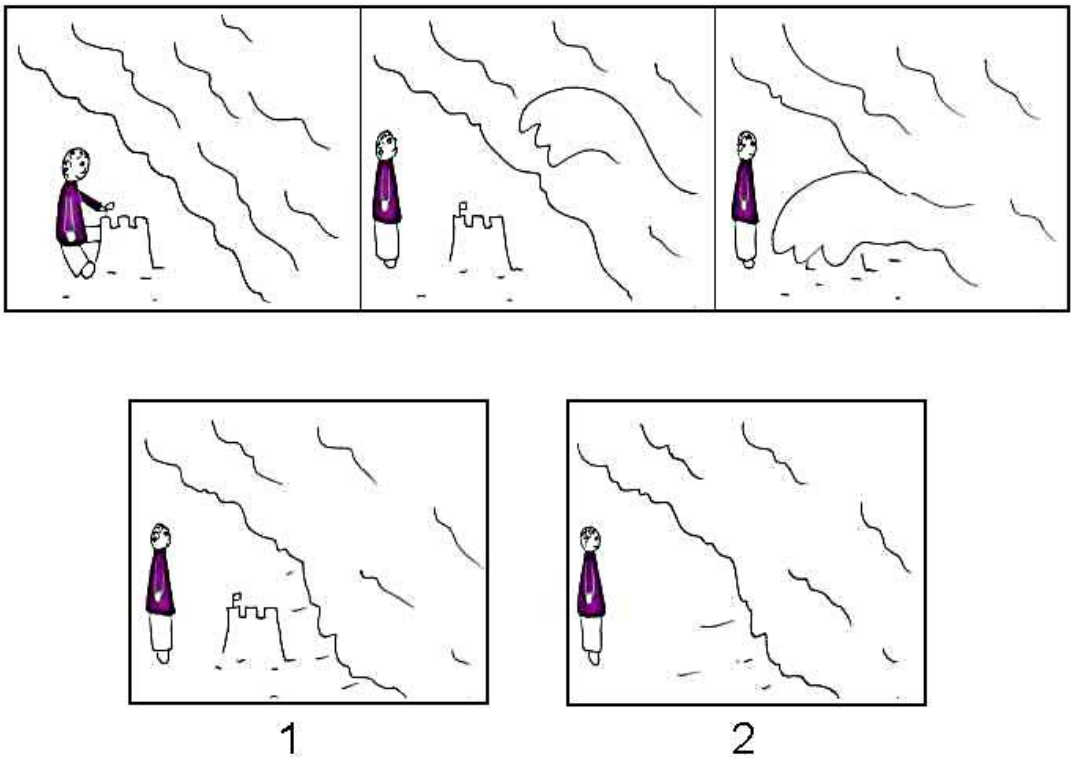

Abb. 9: Comic aus der Kategorie physikalische Kausalitäten mit einer Person

Physikalische Kausalitäten mit zwei Personen (Phys 2)

In den Comics aus der Kategorie physikalische Kausalitäten mit zwei Personen (Phys 2) sollen die Probanden ebenfalls die Folgen einer Handlung oder eines Geschehens erkennen, die einer physikalischen Gesetzmäßigkeit folgen (**Abb. 10**). In den Comics dieser Kategorie kommen allerdings zwei Personen vor, um die Bedingung analog zur sozialen Interaktion mit einzuschließen.

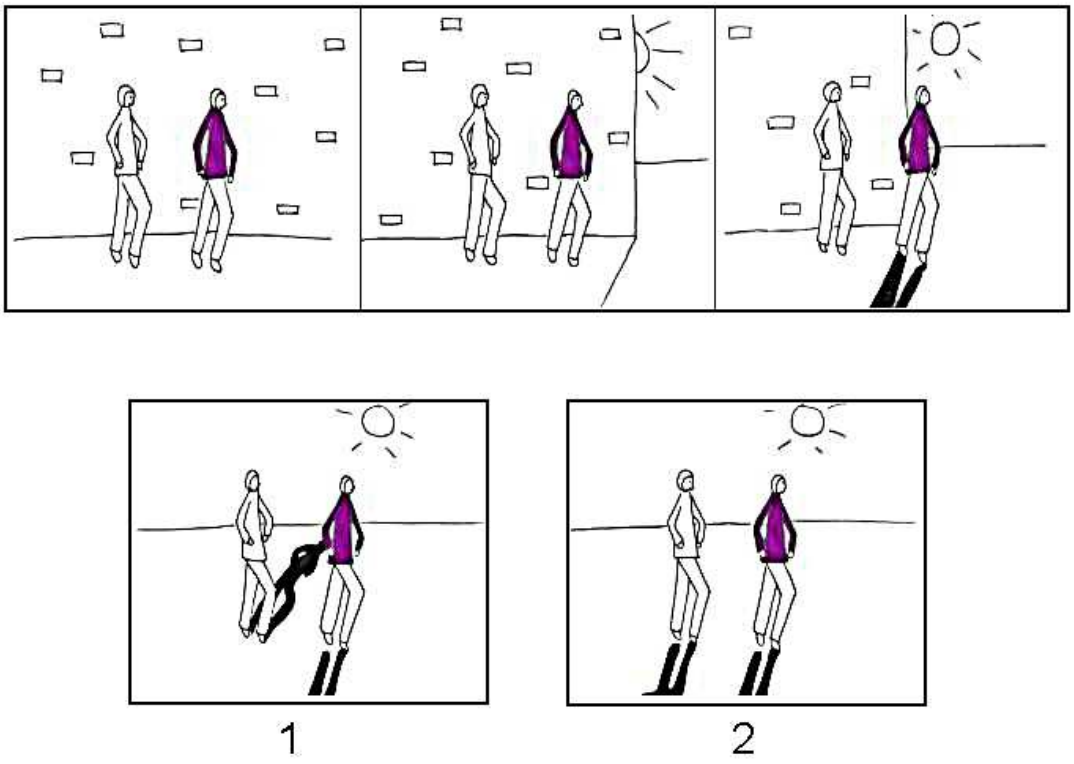

Abb. 10: Comic aus der Kategorie physikalische Kausalitäten mit zwei Personen

2.2.2 Präsentation der Stimuli

Die verwendeten Stimuli werden während der fMRT-Messungen mit dem Programm *Presentation* (Dateiversion 10.007.03.06, Neurobehavioral Systems, Inc., Albany, CA, USA) präsentiert. Ein in Presentation programmiertes Skript legt die genaue zeitliche Abfolge, die Reihenfolge der einzelnen Stimuli und die Präsentation fest.

Der Magnetresonanztomograf steuert den gesamten Ablauf der Stimuli-Präsentation durch Triggersignale. Presentation erhält die Triggersignale vom Magnetresonanztomografen über die serielle Schnittstelle des Laptops, mit dem die Stimuli präsentiert werden.

2.2.3 Projektion der Stimuli

Der Stimuli präsentierende Laptop ist mit einem abgeschirmten VGA-Kabel an einen Projektor außerhalb des Messraums verbunden. Mit dem Projektor werden die Stimuli auf eine Leinwand projiziert, die am Fußende des Messtisches des Magnetresonanztomografen fixiert ist. Über ein antimagnetisches Spiegelsystem auf der Kopfspule können die Probanden die auf die Leinwand projizierten Stimuli sehen.

Bei jedem Probanden wird die Projektion zu Beginn der Messung so eingestellt, dass die Stimuli zentriert und scharf zu sehen sind. Als Testbild wird ein Stimulus verwendet, der nicht während der Messung gezeigt wird.

2.3 Versuchsanordnung

Alle Comics werden in Blöcken während eines Messdurchgangs präsentiert. Ein Block enthält fünf Comics derselben Kategorie. Jede Kategorie wird in zwei Blöcken mit unterschiedlichen Comics präsentiert.

Die einzelnen Blöcke beginnen mit einer Einleitungsfrage (**Tab. 3**). Für die Blöcke der ToM-Kategorie *Intentionserkennung* lautet diese Frage „*was macht die Hauptfigur als nächstes?*“. Die Blöcke der ToM-Kategorie *Emotionserkennung* beginnen mit der Frage „*wodurch fühlt sich die Hauptfigur besser?*“. Die Blöcke für die beiden Nicht-ToM-Kategorien physikalische Kausalitäten werden mit der Frage „*was passiert am wahrscheinlichsten als nächstes?*“ eingeleitet. Die Einleitungsfrage wird für 6 s eingeblendet und dann vom ersten Comic abgelöst. Der gesamte Ablauf eines Comics bildet einen Trial.

Tab. 3: Einleitungsfragen für die einzelnen Blöcke

Kategorie	Einleitungsfrage
Intentionserkennung	Was macht die Hauptfigur als nächstes?
Emotionserkennung	Wodurch fühlt sich die Hauptfigur besser?
Physikalische Kausalitäten	Was passiert am wahrscheinlichsten als nächstes?

Die Comics beginnen mit drei Bildern, welche die Kurzgeschichte einleiten. Die drei Bilder werden für 6 s auf die obere Hälfte der Leinwand projiziert (**Abb. 11**). Anschließend werden zusätzlich zu den drei Anfangsbildern für 4 s auf der unteren Leinwandhälfte die beiden Bilder projiziert, welche die alternativen Ausgangsmöglichkeiten der Kurzgeschichte zeigen. Innerhalb dieser 4 s sollen sich die Probanden für das passendste Ende der Kurzgeschichte entscheiden. Ihre Auswahl können sie mit den zwei oberen Tasten eines 4-Tasten-Tasters treffen. Für die Auswahl stehen unter den zwei Bildern mit den Ausgangmöglichkeiten Zahlen; unter dem linken Bild eine Eins und unter dem rechten Bild eine Zwei. Dementsprechend sollen die Probanden zur Auswahl des linken Bildes die linke Taste und zur Auswahl des rechten Bildes die rechte Taste drücken. Die getroffene Auswahl wird nach den 4 s durch einen quadratischen, schwarzen Rahmen um die Zahl des entsprechenden Bildes für 0,5 s angezeigt. Trifft der Proband innerhalb der 4 s keine Auswahl, werden die Zahlen unter beiden Bildern von einem grauen Quadrat verdeckt. Die Probanden erhalten keinen Hinweis darauf, ob ihre Auswahl die richtige oder falsche Antwort ist. Die Auswahl der Probanden wird von Presentation aufgezeichnet und in einer Textdatei gespeichert. Nach insgesamt 10,5 s beginnt ein neuer Trial mit dem nächsten Comic des Blocks. Die Dauer eines Blocks beträgt 58,5 s (**Abb. 12**).

Ein schwarzes Fixationskreuz wird für 10 s vor Beginn der Messung sowie nach jedem zweiten Block und nach dem letzten Block auf einem dunkelgrauen Hintergrund (RGB Farbwerte: R 128, G 128, B 128) als Ruhebedingung angezeigt.

Die Gesamtdauer eines Durchlaufs mit allen acht Blöcken beträgt 520 s (= 8 min 40 s). Die Kategorien werden in einer festgelegten balancierten Reihenfolge präsentiert. Der zeitliche Ablauf und die Reihenfolge der Kategorien sind in **Abb. 13** dargestellt.

Vor Beginn der Messung werden den Probanden zwei Comics jeder Kategorie gezeigt, damit sie mit dem Ablauf während der Messung vertraut werden. Diese Comics werden nicht für die Messung verwendet.

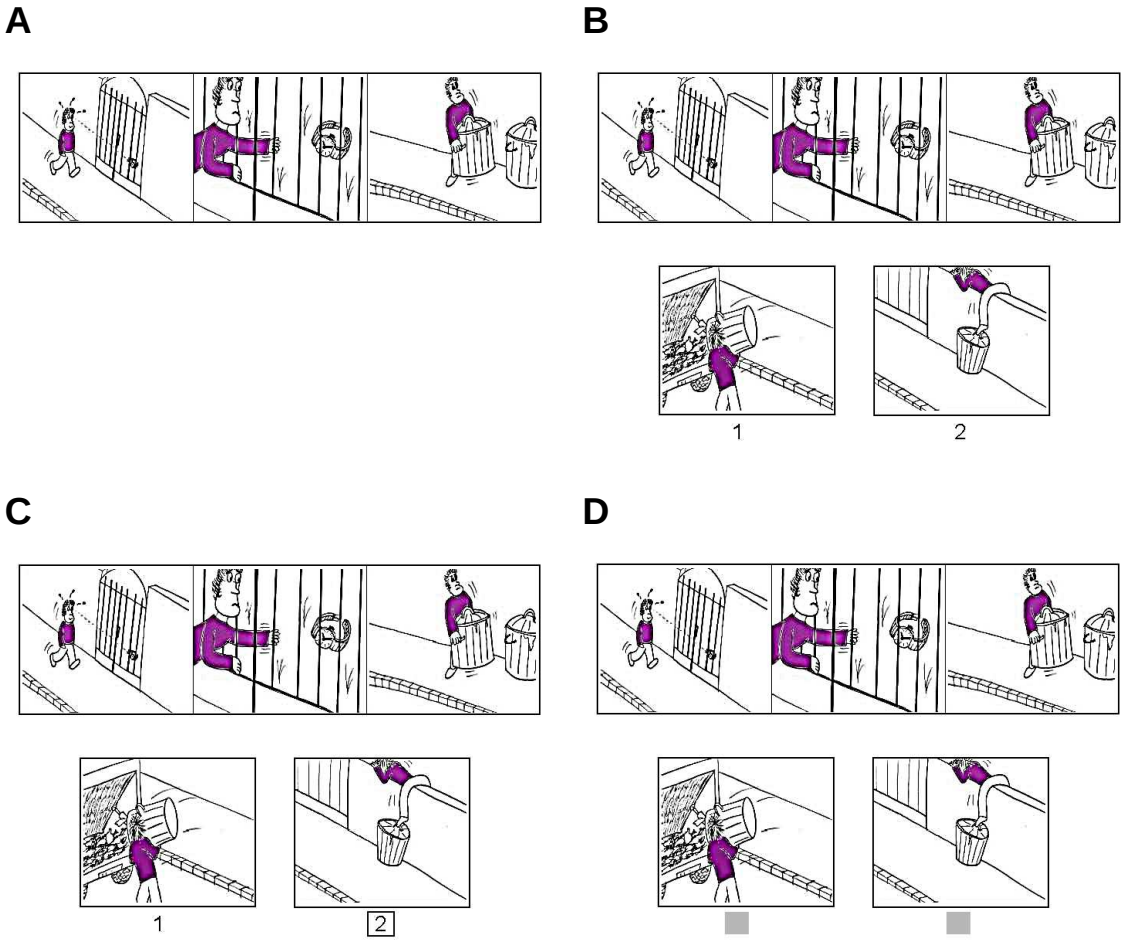

Abb. 11: Präsentation der Comics: Ein Comic beginnt mit drei Bildern (**A**) in der oberen Leinwandhälfte. Nach 6 s folgen die alternativen Wahlmöglichkeiten (**B**), die für 4 s präsentiert werden. Die erfolgte Auswahl wird für 0,5 s durch einen schwarzen Rahmen um die Zahl unter dem ausgewählten Bild angezeigt (**C**). Wird keine Auswahl getroffen, werden beide Zahlen durch ein graues Quadrat verdeckt (**D**).

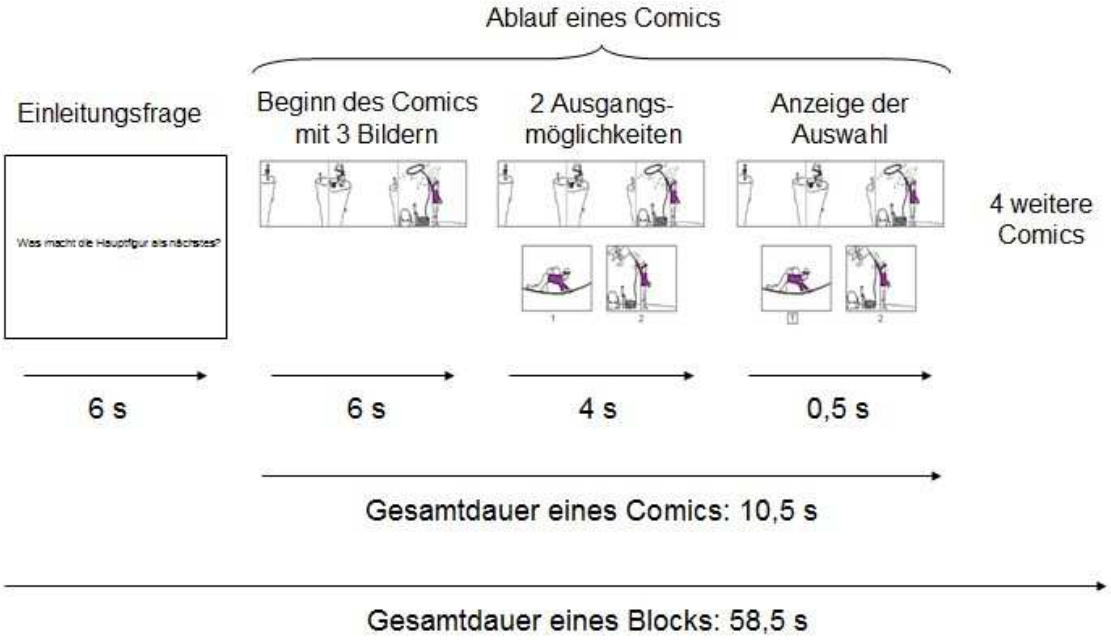

Abb. 12: Zeitlicher Ablauf eines Blocks: Ein Block einer Kategorie beginnt mit der entsprechenden Einleitungsfrage. Nach 6 s wird der erste Comic mit drei einleitenden Bildern auf der oberen Leinwandhälfte für 6 s präsentiert. Anschließend folgen zwei Bilder mit den alternativen Ausgangsmöglichkeiten des Comics auf der unteren Leinwandhälfte für 4 s, innerhalb derer die Probanden das passende Ende des Comics auswählen sollen. Die erfolgte Auswahl wird für 0,5 s durch einen Rahmen um die Zahl unter dem ausgewählten Bild angezeigt. Daraufhin folgen vier weitere Comics mit derselben Abfolge von Bildern. Die Präsentation eines ganzen Comics dauert 10,5 s. Die Gesamtdauer eines Blocks mit der Einleitungsfrage und fünf Comics beträgt 58,5 s. (s = Sekunden)

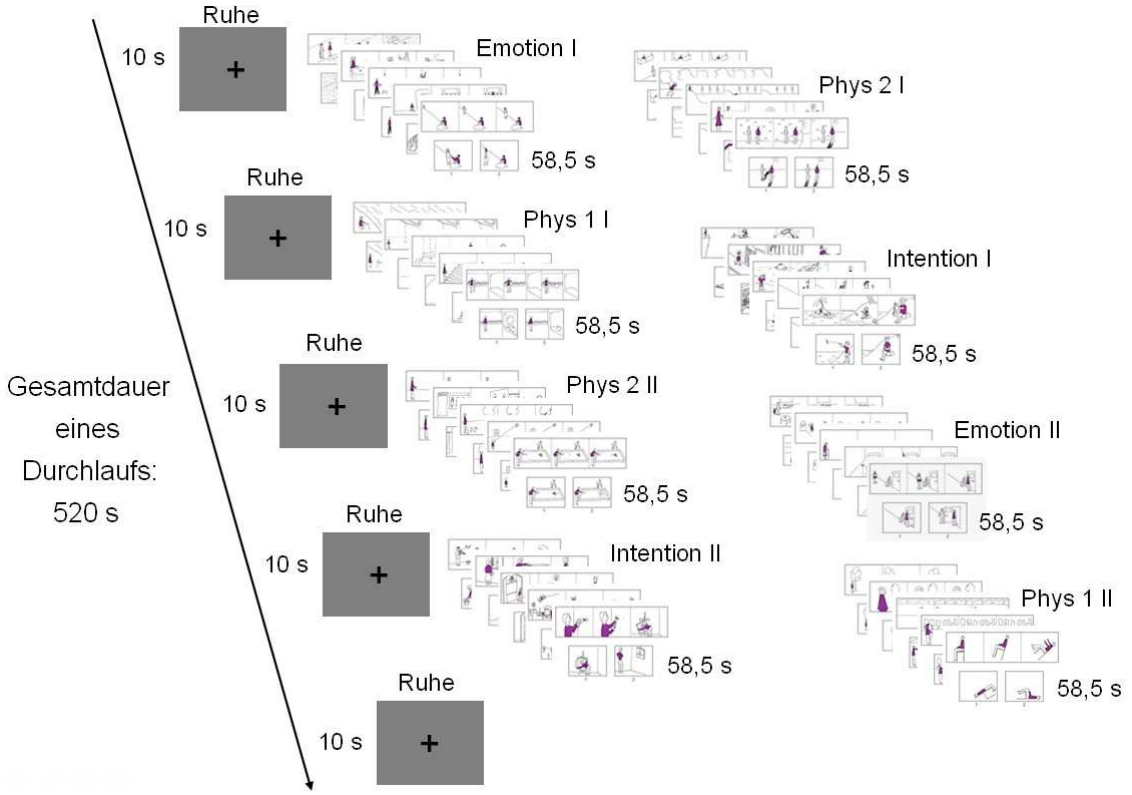

Abb. 13: Zeitlicher Ablauf eines gesamten Versuchsdurchlaufs: Zu Beginn eines Versuchsdurchlaufs wird für 10 s ein schwarzes Fixationskreuz auf grauem Hintergrund als Ruhebedingung (Ruhe) präsentiert. Darauf folgt der erste Block (I) der Kategorie Emotionserkennung (Emotion). Im Anschluss beginnt der erste Block der Kategorie physikalische Kausalitäten mit zwei Personen (Phys 2). Nach erneuter Präsentation der Ruhebedingung für 10 s wird der erste Block der Kategorie physikalische Kausalitäten mit einer Person (Phys 1) präsentiert, dem der erste Block der Kategorie Intentionserkennung (Intention) folgt. Im Anschluss wird erneut die Ruhebedingung für 10 s präsentiert, der sich die zweiten Blöcke (II) der Kategorien physikalische Kausalitäten mit zwei Personen und Emotionserkennung anschließen. Es folgt erneut die Ruhebedingung, nach der die zweiten Blöcke der Kategorien Intentionserkennung und physikalische Kausalitäten mit einer Person präsentiert werden. Abschließend wird die Ruhebedingung gezeigt. In jedem Block werden fünf Comics der jeweiligen Bedingung präsentiert. Die Dauer eines Blocks beträgt 58,5 s. Ein ganzer Versuchsdurchlauf dauert 520 s. (s = Sekunden)

2.4 Datenerhebung mit dem Magnetresonanztomografen

Die Datenerhebung mit dem Magnetresonanztomografen gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt werden morphologische Messungen durchgeführt, mit denen die Anatomie des Probandengehirns erfasst wird. Im zweiten Schritt werden die fMRT-Messungen gemacht, die Aufschluss über die bei den Aufgaben aktivierten Hirnareale geben sollen.

2.4.1 Messung der morphologischen MRT-Daten

Die morphologische Messung beginnt mit einer Sequenz zur Darstellung jeweils einer Schicht des gemessenen Gehirns in den drei Ebenen des Raumes. Diese Darstellung ermöglicht die Festlegung des Messbereiches für die folgende anatomische Sequenz.

Mit der anatomischen Sequenz wird die morphologische Messung fortgeführt. Dabei wird eine *magnetization prepared rapid gradient echo* (MPRAGE)-Sequenz verwendet, die einen hochauflösenden, T1-gewichteten Datensatz des ganzen Gehirns erstellt. Der Datensatz besteht aus 176 axialen Schichten mit einer Schichtdicke von 1 mm und wird für die spätere Auswertung der funktionellen Daten verwendet (**Tab. 4**).

Tab. 4: Parameter der morphologischen Messung (mm = Millimeter, MPRAGE = magnetization prepared rapid gradient echo, ms = Millisekunde, TE = Echozeit, TI = Inversionszeit, TR = Repetitionszeit)

Parameter der morphologischen Messung	
Sequenz	MPRAGE
Schichten (axial)	176
Schichtdicke	1 mm
Pixelgröße	1 x 1 mm^2
TE	3,19 ms
TR	1300 ms
TI	660 ms

2.4.2 Messung der funktionellen MRT-Daten

Zu Beginn der funktionellen Messung wird zunächst wie bei der morphologischen Untersuchung eine Probemessung mit einer Lokalisations-Sequenz (**siehe 1.3.4**) durchgeführt, welche jeweils eine Schicht des gemessenen Gehirns in den drei Ebenen des Raumes erfasst. Anhand dieser Schichten wird dann der Messbereich für die funktionellen Messungen festgelegt. Für die Messung der funktionellen MRT-Daten wird eine T2*-gewichtete Echo-Planar-Sequenz verwendet, bei der insgesamt 254 Messzeitpunkte (Volumina) ausgewählt werden (**Tab. 5**). Die in der vorliegenden Arbeit verwendete EPI-Sequenz umfasst 24 koronare Schichten ohne Zwischenabstand (Gap) und ist in Bezug auf die horizontale Schichtführung um 30° nach anterior-rostral gekippt, um das ganze Gehirn zu erfassen. Die ersten drei EPI Messungen werden vor der Auswertung verworfen, um eine homogene T1-Sättigung zu gewährleisten.

Tab. 5: Parameter der funktionellen Messung (EPI = Echo Planar Imaging, mm = Millimeter, ms = Millisekunde, TE = Echozeit, TR = Repetitionszeit)

Parameter der funktionellen Messung	
Sequenz	EPI
Schichten (koronar)	24
Neigungswinkel	-30°
Schichtdicke	6 mm
Matrix	64 x 64 Voxel
Pixelgröße	3 x 3 mm^2
TE	40 ms
TR	2000 ms

2.5 Auswertung der funktionellen MRT-Daten

Die fMRT-Daten werden mit dem Programm *SPM5* (The Wellcome Department of Imaging Neuroscience, Institute of Neurology, University College London, UK) ausgewertet. Vor der Analyse der fMRT-Aufnahmen wird eine Vorver-

arbeitung der Daten durchgeführt. Diese soll Artefakte minimieren, die durch Lageveränderungen des Kopfes oder durch Abfälle des BOLD-Signals während der Messung entstehen können.

2.5.1 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung beinhaltet eine Bewegungskorrektur (*spatial realignment* und *unwarping*), eine Korrektur der Schichten im Zeitverlauf (*slice time correction*), eine Normalisierung (*normalization*), eine Glättung (*spatial smoothing*) und zeitliche Filterung (*temporal filtering*).

Bewegungskorrektur (spatial realignment und unwarping)

Da die Probanden während der Messung nicht ganz reglos liegen bleiben können, kommt es durch ihre Bewegungen zu Positionsveränderungen des Gehirns im Verlauf der Messung. Dies hat zur Folge, dass ein gemessenes Signal im Verlauf der Messung keiner eindeutigen Quelle zugeordnet werden kann. Zur Vermeidung dieses Problems und zur Minimierung der Abweichung der Signalintensität zwischen einzelnen Volumina wird eine Bewegungskorrektur durchgeführt.

Damit alle möglichen Bewegungsebenen des Kopfes im dreidimensionalen Raum erfasst werden können, erfolgt die Bewegungskorrektur in sechs verschiedenen Richtungen. Die Rotation wird in drei Richtungen um eine x-, y- und z-Achse korrigiert. Die Korrektur der Translation umfasst die restlichen drei Richtungen (links und rechts, hoch und runter, vor und zurück).

Da Bewegungen der Probanden nicht nur zu Lageveränderungen des Gehirns führen, sondern auch die Morphologie des Gehirns verändern können, kommt es zu „Verzerrungen“ des Gehirns. Damit die einzelnen Volumina jedoch möglichst genau zueinanderpassen, werden die morphologischen Veränderungen mit der *unwarping*-Funktion korrigiert.

Als Referenz für die Bewegungskorrektur wird das erste Volumen der funktionellen Messung verwendet. Es kann jedoch jedes andere Volumen des Datensatzes als Referenz definiert werden.

Korrektur der Schichten im Zeitverlauf (slice time correction)

Die EPI-Sequenz misst nicht alle 24 Schichten zum selben Zeitpunkt. Die Schichten werden zeitlich versetzt gemessen, wobei pro Repetitionszeit TR (Zeit zwischen zwei Anregungspulsen) ein Volumen akquiriert wird. Die Messung der Schichten erfolgt abwechselnd (*interleaved*), d. h. zuerst werden die ungeraden (1, 3, 5, …) Schichten und dann die geraden (2, 4, 6, …) Schichten gemessen. Es entstehen somit systematische zeitliche Unterschiede beim Messen aller Schichten. Diese Unterschiede werden mit der *slice time correction* korrigiert. Für jedes einzelne Voxel wird der Intensitätszeitverlauf ermitttelt und anschließend soweit verschoben, als ob alle Voxel zum selben Zeitpunkt gemessen worden seien.

Normalisierung (normalization)

Das Gehirn einzelner Menschen unterscheidet sich in der Größe und in der Form. Dies ist kein Problem, solange man sich nur auf die durch eine Aufgabe aktivierten Areale im Gehirn eines Probanden konzentriert. Für eine Gruppenanalyse jedoch ist es notwendig, dass die Gehirne der einzelnen Probanden möglichst die gleiche Größe und Orientierung besitzen. Dies wird mit der Normalisierung erreicht.

Bei der Normalisierung wird wie bei der Bewegungskorrektur nach Unterschieden zwischen einem Referenzbild und dem zu untersuchendem Bild gesucht, um dieses der Referenz anzugleichen. Das Gehirn wird bei der Bewegungskorrektur allerdings als starrer Köper behandelt, dessen Lage im dreidimensionalen Raum der Lage des Referenzgehirns angepasst wird. Mit der *unwarping*-Funktion werden zwar bei der Bewegungskorrektur auch „Verzerrungen“ beachtet, doch werden dabei nur die Schichten derselben Referenzschicht des Gehirns korrigiert. Die Normalisierung beinhaltet über die Lagekor-

rektur hinaus auch die Anpassung der Gehirnform an ein Referenzgehirn. Das Gehirn wird dafür an den erforderlichen Stellen gestreckt oder komprimiert, während andere Stellen unverändert gelassen werden, bis die Form mit der des Referenzgehirns übereinstimmt.

Als Referenzgehirn wird in der vorliegenden Arbeit das Montreal Neurological Institute (MNI)-Gehirn verwendet. Das Montreal Neurological Institute hat durch Mittelungsverfahren aus mehreren Hunderten morphologischen Messungen von Probandengehirnen ein Referenzgehirn erstellt, das als Standardreferenz in SPM5 verwendet wird.

Die Normalisierung in einen standardisierten Raum ermöglicht nicht nur einen Vergleich der neuronalen Aktivierung der Probanden in der eigenen Studie, sondern auch zwischen unterschiedlichen Studien.

Glättung (spatial smoothing)

Eine Minimierung der Unterschiede zwischen den Probandengehirnen ist auch das Ziel der Glättung. Während die Bewegungskorrektur und die Normalisierung allerdings eine möglichst genaue anatomische Übereinstimmung der untersuchten Gehirne ermöglichen sollen, dient die Glättung der funktionellen Bilder jedes Probanden einer höheren Übereinstimmung der neuronalen Aktivität. Denn die unterschiedliche Anatomie der Probandengehirne erschwert eine genaue Lokalisierung der Aktivität innerhalb dieser Anatomie. Zudem wird durch die Glättung das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert und sie erlaubt jetzt den Einsatz parametrischer statistischer Testverfahren, da durch diese Glättung davon ausgegangen wird, dass die so bearbeiteten Daten normalverteilt sind.

Die Glättung erfolgt durch ein „Verwischen“ der funktionellen Bilder mithilfe einer Gauss-Filtermaske (Kernel), d. h. ein Voxel wird gewichtet und additiv mit benachbarten Voxel verknüpft. Die Wichtung wird durch den Kernel festgelegt.

Die *full width at half maximum* (FWHM) ist ein Maß für die Verteilung der gewichteten Voxel innerhalb des Kernels. Sie gibt an, wie groß der Kernel bei 50 % des höchsten Kernelwertes ist. Voxel innerhalb des FWHM werden stärker

gewichtet als Voxel außerhalb des Bereiches. Die Größe des FWHM Filters wird so ausgewählt, dass sie möglichst mit der Größe der erwarteten Aktivität übereinstimmt. Für die vorliegende Auswertung wird die FWHM-Größe auf 10 mm festgelegt.

Zeitliche Filterung (temporal filtering)

Im letzten Schritt der Vorverarbeitung wird die Signalkurve der funktionellen Daten mit einem Hochpassfilter zeitlich geglättet. Da sehr hohe und sehr niedrige Frequenzen viele Rauschanteile enthalten, rechnet der Hochpassfilter alle Frequenzen aus der Signalkurve heraus, die oberhalb eines festgelegten Zeitintervalls (*cut off period*) liegen. Die *cut off period* wird für die vorliegende Auswertung bei 128 s festgelegt. Zusätzlich werden lineare Trends entfernt. Dadurch verbessert die zeitliche Filterung das Signal-Rausch-Verhältnis.

2.5.2 Datenanalyse der funktionellen MRT-Aufnahmen

Die fMRT-Daten sind nach der Vorverarbeitung für die Analyse der bei den verwendeten Aufgaben aktivierten Hirnareale bereit. Zum Abschätzen des BOLD-Signals jedes Probanden wird das Generelle Lineare Modell (GLM) verwendet. Das Blockdesign (**siehe 1.3.3**) bildet die Grundlage der Analyse.

In der vorliegenden Arbeit wird die Anzahl aktiver Voxel innerhalb einer Region mit einem binominal Test berechnet. Alle anderen statistischen Signifikanzen werden mit dem Student’s t-Test berechnet. Für alle Analysen wird, solange es nicht anders angegeben wird, eine Wahrscheinlichkeit für falsch positive Ergebnisse von p = 0,05 angenommen.

2.5.2.1 Designmatrix

Die statistische Auswertung der fMRT-Daten dient dazu, die Hypothese, wie das Gehirn auf die Veränderungen von Versuchsparametern reagiert, zu überprüfen. Für die Hypothese wird zunächst ein Modell erstellt, das in SPM5 als

Designmatrix eingegeben wird. In der Designmatrix werden die einzelnen Versuchsbedingungen und deren Start- und Endzeiten festgelegt. Dabei entspricht jede Spalte der Designmatrix einer Versuchsbedingung und jede Zeile einer fMRT-Aufnahme. Das Ganze beruht auf der Annahme, dass die gewichtete Aktivität einiger Voxel statistisch signifikant mit einer Kombination der Versuchsbedingungen und Parameter kovariiert.

In der vorliegenden Analyse wird in der Designmatrix ein Blockdesign als *box car*-Funktion modelliert. Die *box car*-Funktion kodiert eine Null für keine Aufgaben und eine Eins für eine Aufgabe. Da Hirnareale in der Realität nicht, wie in der *box car*-Funktion modelliert, plötzlich aktiv und ebenso plötzlich inaktiv sind, wird die *box-car*-Funktion an die in SPM5 implementierte *hemodynamic response function* (HRF) (**siehe 1.3.2**) angepasst. Die so erstellten Modelle enthalten vier Regressoren, je einen für jede Versuchsbedingung (Intentionserkennung, Emotionserkennung, Phys 1, Phys 2).

2.5.2.2 Das Generelle Lineare Modell (GLM)

Die statistische Auswertung der fMRT-Daten dient zur Überprüfung der Hypothese, wie das Gehirn auf die Veränderungen von Versuchsparametern reagiert. Für die Hypothese wird zunächst ein Modell erstellt, das in SPM5 als *box car*-Funktion eingegeben und mit der implementierten HRF angepasst wird.

Das für die Hypothese erstellte Modell wird Voxel für Voxel auf die Übereinstimmung mit den tatsächlichen Daten analysiert. Grundlage hierfür ist der Verlauf des BOLD-Signals, das während neuronaler Aktivierung ansteigt und in Ruhephasen abfällt. Die Übereinstimmung des im Modell angenommenen Zeitverlaufs und des tatsächlichen Zeitverlaufs wird mit dem Generellen Linearen Modell (GLM) untersucht. Das GLM überprüft mittels multipler Regression die Zeitverläufe und integriert Korrelations-, Varianz und Regressionsanalysen. Dabei wird untersucht, in wie weit die Einflussgrößen von Zielgrößen abhängen. Grundlage des GLM ist die Annahme, dass sich ein gemessener, individueller Wert Y (abhängige Variable) durch eine Designmatrix erklären lässt (Bortz 2005). Diese Designmatrix stellt eine Linearkombination von unabhängigen

Prädiktorvariablen (X) dar, die durch Regressionskoeffizienten (β) gewichtet werden. Während die Werte der Prädiktorvariablen (X) gemessen werden, sind die Werte der Regressionskoeffizienten (β) zunächst nicht bekannt. Sie werden im Rahmen einer Regressionsanalyse in Bezug auf die Voxel geschätzt. Ein Regressionskoeffizient (*parameter estimates* oder *beta weights*) gibt an, wie stark eine bestimmte Versuchsbedingung an der Wichtung eines Voxels beteiligt ist, und beschreibt somit, wie die Prädiktorvariablen die hämodynamische Antwort eines Voxels beeinflussen.

Da eine Linearkombination in der Regel nur eine Schätzung des wahren Wertes Y angibt, ist eine genaue Wertangabe aus den Prädiktorvariablen (X) alleine nicht möglich. Ursache hierfür können ein Mangel an Prädiktorvariablen (X) oder Messfehler sein. Durch Einbeziehen eines multivarianten, normalverteilten Fehlerterms (ε) mit stochastisch unabhängigen Einzelkomponenten erhält man den „wahren“ Wert Y **(1)**. Hierbei bestimmt ein Schätzalgorithmus die Wichtungen der Prädiktorvariablen (X) durch die Regressionskoeffizienten (β) so, dass eine Minimierung des Fehlerterms (ε) erreicht wird. Durch die Größe des Fehlerterms können Abweichungen der Werte von der abhängigen Variable Y vom angenommenen Modell erklärt werden.

(1) $$Y_{ij} = \beta_{1ij}X_{1ij} + \beta_{2ij}X_{2ij} + \ldots \beta_{kij}X_{kij} + \varepsilon_{ij}$$

i = Messwiederholungen, j = Voxelanzahl, k = Prädiktorenzahl

Bei einer aus Linearkombinationen bestehenden Designmatrix eines Experiments entsprechen die Spalten den Versuchsbedingungen. Jede Zeile der Designmatrix entspricht einer fMRT-Aufnahme.

2.5.2.3 Kontraste

Die *effects of interest*, d. h. die erwartete Hirnaktivität während eines Experiments, beruhen auf Variationen des BOLD-Signals (**siehe 1.3.1**) während der einzelnen experimentellen Bedingungen. So kann das Signal z. B. beim Ausführen einer Aufgabe zunehmen, während es in Ruhe wieder abnimmt. Die unterschiedlichen Bedingungen stellen unabhängige Variablen dar, die systematisch

verändert werden. Der Ort der Aktivierung stellt die abhängigen Variablen dar. Zur Darstellung der *effects of interest*, und somit zur Identifizierung von aktivierten Hirnarealen während einer bestimmten Bedingung, werden Kontraste erstellt. Dabei wird die Aktivierung der untersuchten Bedingung z. B. mit einer Kontrollbedingung verglichen. In die weiterführende Analyse werden nur aktive Voxel übernommen, die ein festgelegtes Signifikanzniveau überschreiten. In der vorliegenden Arbeit wird das Signifikanzniveau der Aktivität der Einzelvoxel für alle Kontraste bei t = 3,4, entsprechend p = 0,0005, unkorrigiert, festgelegt. Zudem werden nur Aktivitätscluster mit einer Größe von mindestens 20 Voxeln in die Analyse aufgenommen.

Die mit dem GLM berechneten Regressionskoeffizienten jedes Probanden werden für die Gruppenanalyse in eine 1 x 4 univariate Varianzanalyse (*analysis of variance*, ANOVA) eingegeben. Ein linearer Kontrast in dieser ANOVA dient der Identifizierung von Hirnarealen, die in den ToM-Bedingungen stärker aktiv sind als in den Nicht-ToM-Bedingungen. Dieser Kontrast ähnelt der *conjunction analysis* aus der Studie von Völlm et al. (2006), außer dass in der vorliegenden Analyse weder bei Intentionserkennung noch Emotionserkennung eine stärkere Aktivierung als bei den physikalischen Kausalitäten vorhanden sein muss. Die für Intentionserkennung und Emotionserkennung spezifische Hirnaktivität wird mit einem weiteren linearen Kontrast untersucht. Dieser Kontrast ähnelt der *interaction analysis* aus der Studie von Völlm et al. (2006). Doch der vorliegende Kontrast schließt die beiden Nicht-ToM-Bedingungen nicht in die Analyse mit ein, wodurch die Möglichkeit ausgeschlossen wird, dass ein signifikanter Effekt in diesem Kontrast von einem signifikanten Unterschied zwischen den beiden Nicht-ToM-Bedingungen herrührt. Zusätzlich wird nach Hirnarealen gesucht, die in der Intentions- und Emotionserkennung stärker aktiv sind als in den Nicht-ToM-Aufgaben. Diese beiden Kontraste dienen der zusätzlichen Identifizierung von Hirnarealen, die nur während Intentionserkennung oder Emotionserkennung aktiv sind, aber keinen signifikanten differenzierten Effekt für einen ToM-Typ zeigen. Alle Kontraste sind in **Tab. 6** aufgelistet.

Tab. 6: Kontraste für den Haupteffekt von ToM, den differenzierten Effekt und den einfachen Haupteffekt für die einzelnen ToM-Bedingungen (Phys 1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und mit zwei Personen, ToM = Theory of Mind, vs. = versus)

Haupteffekt für ToM	
ToM vs. Nicht-ToM	(Intentionserkennung + Emotionserkennung) – (Phys 1 + Phys 2)
Differenzierter Effekt für die einzelnen ToM-Typen	
Intentionserkennung vs. Emotionserkennung	Intentionserkennung – Emotionserkennung
Emotionserkennung vs. Intentionserkennung	Emotionserkennung – Intentionserkennung
Einfacher Haupteffekt für die einzelnen ToM-Typen	
Intentionserkennung vs. Phys 1 und Phys 2	Intentionserkennung – (Phys 1 + Phys 2)/2
Emotionserkennung vs. Phys 1 und Phys 2	Emotionserkennung – (Phys 1 + Phys 2)/2

2.5.2.4 Untersuchung der räumlichen Aktivitätsmaxima während unterschiedlicher Bedingungen

Zur Abklärung der Frage einer spezifischen Aktivierung der TPJ für bestimmte mentale Zustände erfolgt ein Vergleich der räumlichen Abstände zwischen den Aktivierungspeaks bei den einzelnen Bedingungen und zwischen dem ersten und zweiten Block derselben Bedingung. Für jeden Probanden werden die Aktivierungspeaks für jede einzelne Bedingung in individuellen *statistical parametric maps* (SPMs) ermittelt. Ein Akitvierungspeak wird definiert als ein lokales Maximum, das dem signifikantesten Voxel in der TPJ aus der Gruppenanalyse am nächsten gelegen ist. Das lokale Maximum muss zudem größer sein als $t = 1,7$, entsprechend $p = 0,05$ mit $df > 100$. In die Analyse werden nur die Probanden mit einem Aktivierungspeak innerhalb eines Radius von 30 mm um den am stärksten aktivierten Voxel der Gruppenanalyse aufgenommen. Für jeden Probanden werden die räumlichen Abstände der Aktivierungspeaks in x, y, und z Richtung eines dreidimensionalen Koordinatensystems berechnet. Die errechneten Abstände werden auf Gruppenebene auf ihre statistische Signifikanz untersucht. Die Aktivierungspeaks werden unter zwei Bedingungen als räumlich voneinander getrennt betrachtet: (1) der Abstand zwischen diesen Peaks muss

sich statistisch von Null unterscheiden, und (2) der Abstand muss größer sein als der Abstand zwischen den innerhalb derselben Region liegenden Peaks des ersten und zweiten Blocks. Zur Feststellung, ob die Abstände zwischen den Peaks unterschiedlicher Bedingungen größer sind als der Abstand zwischen den Peaks des ersten und zweiten Blocks derselben Bedingung, werden zunächst für die drei Richtungen des Koordinatensystems die durchschnittlichen Peakabstände für unterschiedliche Bedingungen berechnet. Im nächsten Schritt werden die Abstände der Peaks des ersten und zweiten Blocks in derselben Richtung gemessen.

2.6 Analyse der Task Performance

Zur Analyse der Task Performance wird zunächst die durchschnittliche Antwortzeit berechnet. Daraufhin werden die Antwortzeiten für die ToM-Bedingungen und die Nicht-ToM-Bedingungen sowie für die ToM-Bedingungen untereinander verglichen.

Zur Feststellung, ob die Task Performance der Probanden signifikant besser ist als bei Zufall, wird die Antworttrefferquote der Probanden für jede Aufgabe und insgesamt berechnet. Die Antworttrefferquoten der einzelnen Aufgaben werden auch untereinander verglichen, um Unterschiede im Schwierigkeitsgrad der Aufgaben aufzudecken.

3 Ergebnisse

3.1 Task Performance

Die Antworten und Antwortzeiten von zwei Probanden konnten aufgrund eines Aufzeichnungsfehlers nicht in die Analyse mit aufgenommen werden. Von den verbleibenden 22 Probanden antworteten mehr als die Hälfte bei jedem Trial. Nur ein Proband gab bei mehr als einem Trial (zwei Trials) keine Antwort.

3.1.1 Antwortzeiten

Die Spanne der Antwortzeiten lag zwischen 1,8 s bis 2,4 s. Die durchschnittliche Antwortzeit betrug 2,1 s. Die Probanden antworteten bei den ToM-Bedingungen etwas schneller als bei den Nicht-ToM-Bedingungen. Der Vergleich zwischen den einzelnen ToM-Bedingungen zeigte eine etwas schnellere Antwortzeit bei der Emotionserkennung als bei der Intentionserkennung. Jedoch erreichten all diese Unterschiede keine statistische Signifikanz. Die durchschnittlichen Antwortzeiten aller Probanden können aus **Tab. 7** entnommen werden. Der Haupteffekt für ToM lag bei $t = -1,8$; $df = 21$; $p = 0,09$; two tailed. Der differenzierte Effekt für die beiden ToM-Bedingungen lag bei $t = 1,6$; $df = 21$; $p = 0,12$.

Tab. 7: Task Performance: Durchschnittliche Antwortzeiten und Antworttrefferquoten aller Probanden (ms = Millisekunde, Phys 1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und mit zwei Personen, ToM = Theory of Mind)

Aufgabe	Antwortzeit [ms] (+/- Standardabweichung)	Antworttrefferquote [%] (niedrigster Wert)
Intentionserkennung	2010 (+/- 250)	88 (60)
Emotionserkennung	2140 (+/- 330)	85 (56)
Phys 1	2150 (+/- 460)	92 (70)
Phys 2	2250 (+/- 320)	90 (70)
Durchschnitt ToM	2080 (+/- 210)	86 (58)
Durchschnitt Phys 1 und 2	2200 (+/- 280)	91 (74)
Gesamtdurchschnitt	**2140 (+/- 190)**	**89 (69)**

3.1.2 Antworttrefferquoten

Alle Probanden antworteten signifikant besser als zufällig in allen Trials. Die geringste Antworttrefferquote betrug 69 %, was 27 Trials aus insgesamt 40 Trials entspricht ($p < 0,05$). Darüber hinaus antworteten über 80 % der Probanden besser als zufällig in den Trials jeder einzelnen Aufgabe. Die geringste Trefferquote betrug 80 %, was 8 von 10 Trials entspricht ($p < 0,05$). Die durchschnittlichen Antworttrefferquoten zusammen mit der jeweils geringsten Trefferquote für jede Aufgabe können aus **Tab. 7** entnommen werden.

Die Trefferquoten waren während der ToM-Bedingungen etwas geringer als während der Nicht-ToM-Bedingungen. Sie sind ebenfalls etwas geringer während Emotionserkennung als während Intentionserkennung. Doch auch hier erreichten die Unterschiede wie bei den Antwortzeiten keine statistische Signifikanz. Der Haupteffekt für die ToM lag bei $t = -2,0$; $df = 21$; $p = 0,06$; two tailed. Der differenzierte Effekt für die beiden ToM-Typen lag bei $t = -1,6$; $df = 21$; $p = 0,12$.

3.2 Hirnaktivität

Um Aussagen über die Hirnaktivität während einer Aufgabe allgemein und im speziellen über die an einer Aufgabe beteiligten aktivierten Hirnareale machen zu können, wurden die funktionellen MRT-Daten in mehreren Schritten ausgewertet (**siehe 2.5**).

Aktive Hirnareale während einzelner Aufgaben

Die Hirnareale mit stärkerer Aktivierung während der ToM-Bedingungen im Vergleich zu den Nicht-ToM-Bedingungen umfassten die linke und rechte TPJ, den Precuneus sowie visuelle Areale des occipitalen und temporalen Kortex (**Abb. 14**). Die Koordinaten der aktivierten Hirnareale können der **Tab. 8** entnommen werden.

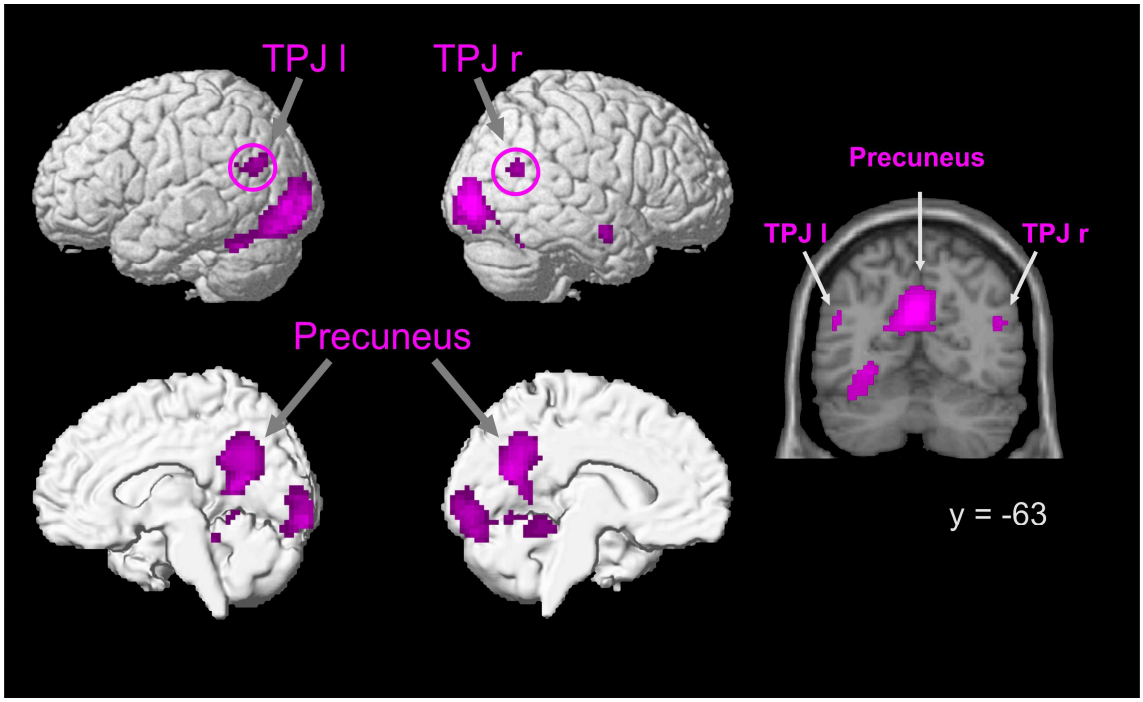

Abb. 14: Hirnaktivität bei ToM-Bedingungen im Vergleich zu Nicht-ToM-Bedingungen: Dargestellt sind die Areale, welche eine stärkere Aktivität während der beiden ToM-Bedingungen zeigten. Die Aktivität ist auf gerenderte Gehirne in der lateral (links oben) und medial Ansicht (links unten) sowie auf einen koronaren Schnitt (y-Koordinate: -63) eines Standard-Gehirns (Montreal Neurological Institute) projiziert. Signifikanzniveau t = 3,4 (p = 0,0005), minimale Clustergröße: 20 Voxel (TPJ l = linke temporo-parietale Junktion, TPJ r = rechte temporo-parietale Junktion)

Tab. 8: Hirnaktivität für ToM im Vergleich zu Nicht-ToM (MNI = Montreal Neurological Institute, t = Signifikanzniveau, ToM = Theory of Mind)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
ToM versus Nicht-ToM		
Precuneus (517 Voxel)		
Precuneus links	-9 -58 17	4,1
Gyrus calcarinus links	-12 -51 6	4,0
Precuneus rechts	3 -60 30	6,2
Gyrus calcarinus rechts	15 -54 12	4,8
Temporo-parietale Junktion links (34 Voxel)		
Gyrus angularis links	-42 -69 27	4,2
Gyrus angularis links	-45 -70 29	4,1
Temporo-parietale Junktion rechts (30 Voxel)		
Gyrus temporalis medialis rechts	48 -60 21	4,0

Hirnareale mit stärkerer Aktivierung beim Erkennen von Intentionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten umfassten den Precuneus sowie temporo-parietale Areale des visuellen Kortex (**Abb. 15**). **Tab. 9** enthält die Koordinaten der an diesem Kontrast beteiligten Hirnareale.

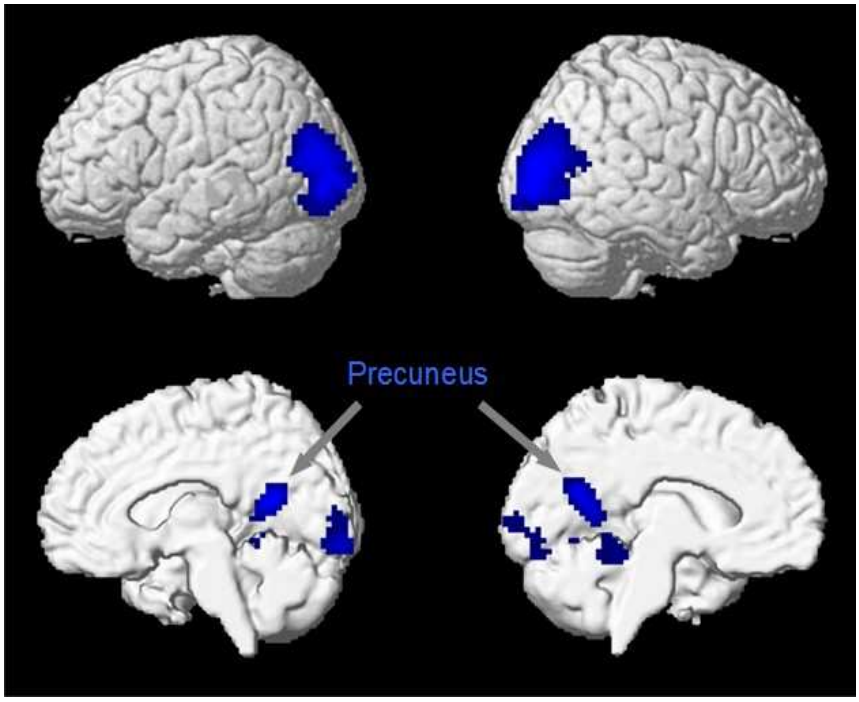

Abb. 15: Hirnaktivität beim Erkennen von Intentionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten (Phys 1 und Phys 2): Die bei der Intentionserkennung stärkere Aktivität ist auf lateralen (oben) und medialen (unten) Ansichten eines gerenderten Gehirns projiziert. Signifikanzniveau t = 3,4 (p = 0,0005), minimale Clustergröße: 20 Voxel

Tab. 9: Hirnaktivität für Intentionserkennung im Vergleich zu den Nicht-ToM-Bedingungen (MNI = Montreal Neurological Institute, Phys 1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und zwei Personen, , t = Signifikanzniveau)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Intentionserkennung versus Phys 1 und Phys 2		
Precuneus (160 / 134 Voxel)		
Precuneus links	-15 -57 15	5,8
Precuneus rechts	15 -54 15	6,8

Die Hirnareale mit stärkerer Aktivierung beim Erkennen von Emotionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten umfassten den Precuneus, die linke TPJ und den MPFC (**Abb. 16**). **Tab. 10** enthält die Koordinaten der an diesem Kontrast beteiligten Hirnareale.

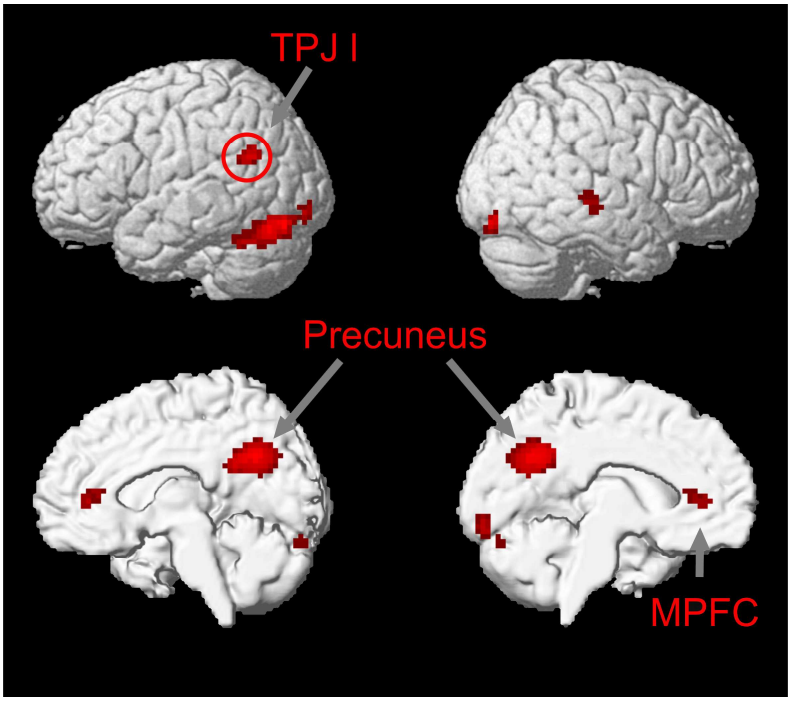

Abb. 16: Hirnaktivität beim Erkennen von Emotionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten (Phys 1 und Phys 2): Die bei der Emotionserkennung stärkere Aktivität ist auf laterale (oben) und mediale (unten) Ansichten eines gerenderten Gehirns projiziert. Signifikanzniveau t = 3,4 (p = 0,0005), minimale Clustergröße: 20 Voxel (MPFC = medialer präfrontaler Kortex, TPJ l = linke temporo-parietale Junktion)

Tab. 10: Hirnaktivität für Emotionserkennung im Vergleich zu den Nicht-ToM-Bedingungen (MNI = Montreal Neurological Institute, Phys 1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und zwei Personen, t = Signifikanzniveau)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Emotionserkennung versus Phys 1 und Phys 2		
Precuneus (267 Voxel)		
Precuneus rechts	3 -60 33	6,1
Temporo-parietale Junktion links (40 Voxel)		
Gyrus angularis links	-48 -60 24	4,2
Medialer präfrontaler Kortex (35 Voxel)		
Anteriorer cingulärer Kortex	0 35 11	4,2

Der Lobus parietalis superior (*superior parietal lobule*, SPL) sowie occipitale und temporale Areale waren beim Erkennen von Intentionen stärker aktiv als beim Erkennen von Emotionen (**Abb. 17**). Dagegen waren der anteriore cinguläre Kortex im MPFC und die Amygdala beim Erkennen von Emotionen stärker aktiv als beim Erkennen von Intentionen (**Abb. 17**). Die Koordinaten der an diesen beiden Kontrasten beteiligten Hirnareale können **Tab. 11** und **Tab. 12** entnommen werden.

Die aktivierten visuellen Areale für alle Kontraste sind im **Anhang 2** aufgelistet.

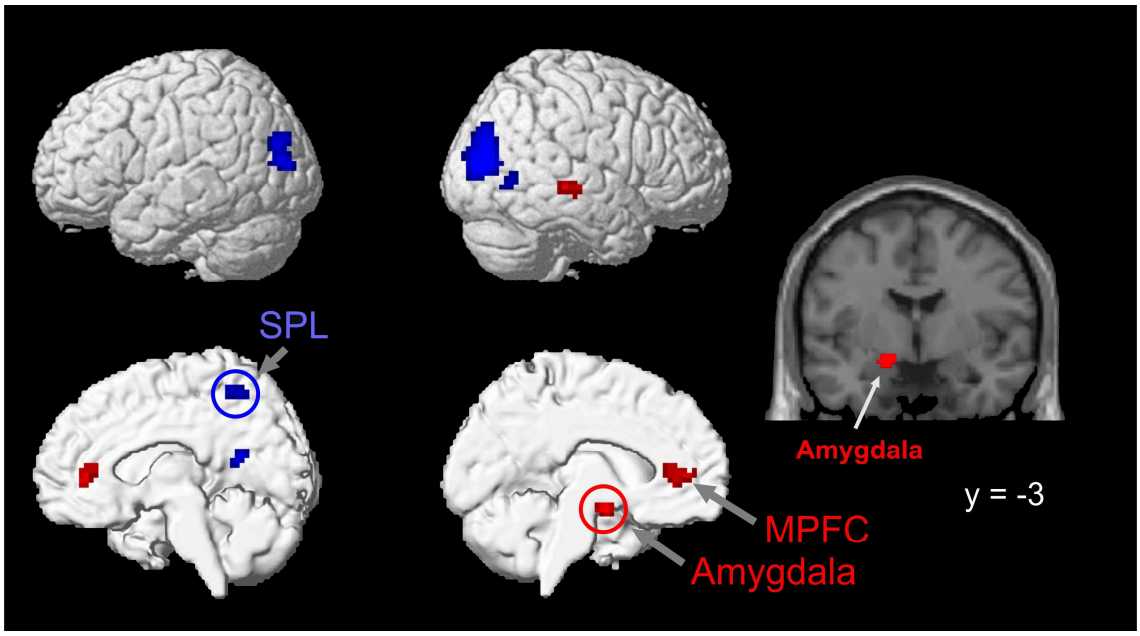

Abb. 17: Hirnaktivität bei ToM-Bedingungen: Dargestellt sind die Areale, welche stärkere Aktivität für Intentionserkennung im Vergleich zur Emotionserkennung (blau) und umgekehrt (rot) zeigen. Die Aktivität ist auf gerenderte Gehirne in der lateral (links oben) und medial (links unten) Ansicht sowie auf einen koronaren Schnitt (y-Koordinate: -3) eines Standard-Gehirns (Montreal Neurological Institute) projiziert. Signifikanzniveau t = 3,4 (p = 0,0005), minimale Clustergröße: 20 Voxel (MPFC = medialer präfrontaler Kortex, SPL = Lobus parietalis superior)

Tab. 11: Hirnaktivität für Intentionserkennung im Vergleich zu Emotionserkennung (MNI = Montreal Neurological Institute, t = Signifikanzniveau)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Intentionserkennung versus Emotionserkennung		
Lobus parietalis superior rechts (32 Voxel)		
Lobus parietalis superior rechts (Brodmann Areal 7A)	15 -57 57	4,4
Precuneus (30 Voxel)		
Precuneus rechts	18 -54 15	4,7

Tab. 12: Hirnaktivität für Emotionserkennung im Vergleich zu Intentionserkennung (MNI = Montreal Neurological Institute, t = Signifikanzniveau)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Emotionserkennung versus Intentionserkennung		
Medialer präfrontaler Kortex (78 Voxel)		
Anteriorer cingulärer Kortex	0 39 6	4,1
Anteriorer cingulärer Kortex links	-3 45 6	3,8
Amygdala links (24 Voxel)		
Amygdala links	-15 -3 -15	4,5

Regressionskoeffizienten (parameter estimates)

Die Untersuchung der Regressionskoeffizienten zeigte deutliche Unterschiede in der Aktivität der in den einzelnen Kontrasten gefundenen Hirnareale (**Abb. 18**).

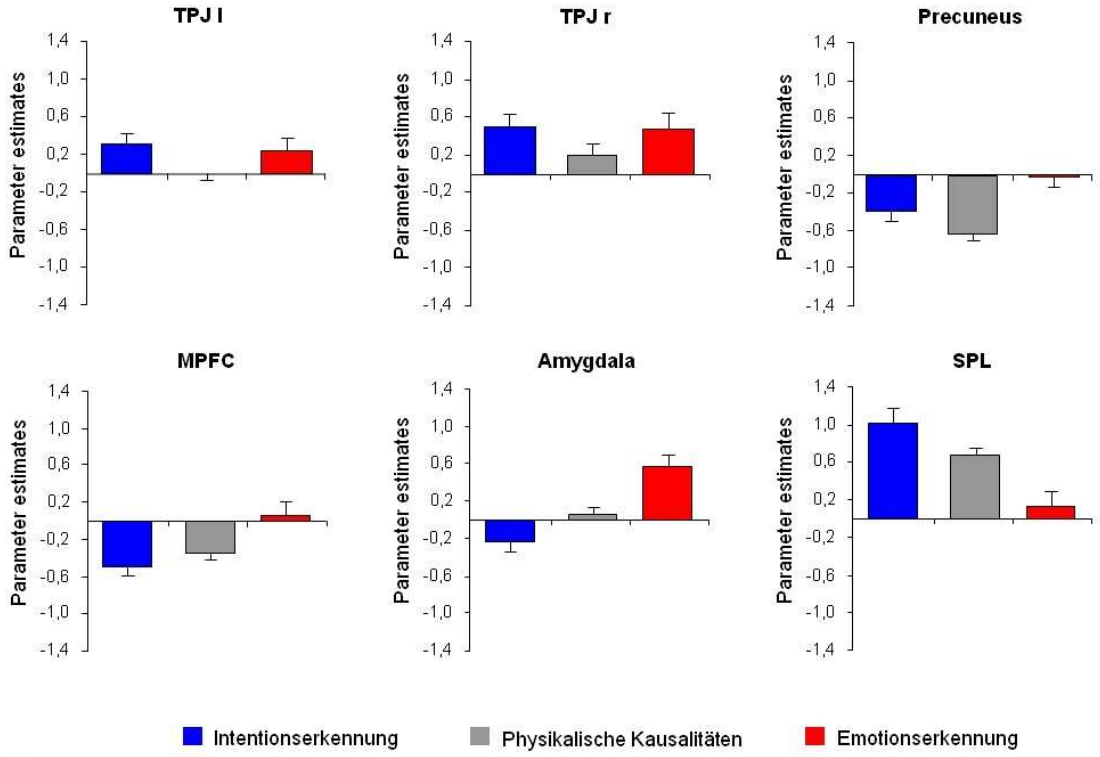

Abb. 18: Regressionskoeffizienten (*parameter estimates*): Die 6 Säulendiagramme zeigen die *parameter estimates* für die Hirnareale mit Aktivierung während der ToM-Bedingungen (Intentionserkennung [blaue Säule] und Emotionserkennung [rote Säule]) und der Nicht-ToM-Bedingungen (graue Säule) (MPFC = medialer präfrontaler Kortex, SPL = Lobus parietalis superior, TPJ l = linke temporo-parietale Junktion, TPJ r = rechte temporo-parietale Junktion)

So zeigte die TPJ während beiden ToM-Bedingungen zwar Aktivierung, doch fiel diese unterschiedlich aus. Die Aktivierung während beiden ToM-Bedingungen war in der rechten TPJ stärker als in der linken TPJ, wobei beide mentalen Zustände etwa zu gleich starker Aktivierung in der jeweiligen TPJ führten. Die beiden Nicht-ToM-Bedingungen führten in der rechten TPJ zu einer deutlichen, aber nur etwa halb so starken Aktivierung wie die beiden ToM-Bedingungen. Die Aktivierung in der linken TPJ bei den beiden Nicht-ToM-

Bedingungen bewegte sich etwa auf Höhe der Grundaktivität. Die Regressionskoeffizienten zeigen, dass die rechte TPJ sowohl beim Erkennen der mentalen Zustände als auch beim Erkennen der physikalischen Kausalitäten aktiv war, jedoch durch die beiden ToM-Bedingungen stärker aktiviert wurde als durch die Nicht-ToM-Bedingungen. Die linke TPJ dagegen scheint eine höhere Aktivierungsschwelle zu haben, welche von den ToM-Bedingungen, nicht aber von den Nicht-ToM-Bedingungen erreicht wurde. Festzuhalten ist auch, dass sowohl die linke als auch die rechte TPJ nicht in Abhängigkeit von einem der beiden untersuchten mentalen Zustände unterschiedlich aktiviert, sondern allgemein durch beide ToM-Aufgaben gleichermaßen aktiviert zu werden scheinen. Die Aktivierung im Precuneus zeigte nicht nur einen Unterschied zwischen den ToM- und Nicht-ToM-Bedingungen, sondern auch zwischen den beiden ToM-Bedingungen. Die Aktivierung lag beim Erkennen von Intentionen deutlich unter der Grundaktivität. Auf das Erkennen von Emotionen reagierte der Precuneus dagegen nur minimal, wie die unmittelbar unterhalb der Grundaktivität liegende Aktivierung beim Erkennen von Emotionen zeigte. Die Aktivität während den Nicht-ToM-Bedingungen sank noch stärker unter die Grundaktivität als bei der Intentionserkennung. Die unterschiedliche Reaktion auf die beiden ToM-Bedingungen zeigt eine von den beiden untersuchten mentalen Zuständen abhängige Aktivierung des Precuneus. Auch der MPFC reagierte unterschiedlich auf alle Versuchsbedingungen. Während die Aktivität im MPFC bei den Nicht-ToM-Bedingungen und dem Erkennen von Intentionen unter die Grundaktivität sank, lag sie beim Erkennen von Emotionen zwar nicht weit aber immer noch eindeutig über der Grundaktivität wie in der TPJ. Die Regressionskoeffizienten zeigten eine vom mentalen Zustand abhängige Aktivierung des MPFC. Daher ist der MPFC wesentlich stärker an Emotionserkennung als an Intentionserkennung beteiligt. Der SPL, der in vorangegangenen Studien zu ToM noch nicht beschrieben wurde, zeigte eine zum MPFC gegensätzliche Aktivierung. Sie lag beim Erkennen von Emotionen etwa auf gleicher Höhe wie im MPFC, stieg aber während des Erkennens von Intentionen noch weiter als in der rechten TPJ über die Grundaktivität an. Auch die Aktivierung während den beiden Nicht-ToM-Bedingungen war im SPL stärker als in der rechten TPJ. Der SPL zeigt

wie die rechte TPJ deutliche Aktivierungen über der Grundaktivität sowohl für die ToM- als auch für die Nicht-ToM-Bedingungen, doch wird im Gegensatz zur rechten und linken TPJ eine deutlich vom zu erkennendem mentalen Zustand abhängige Aktivierung in der SPL offensichtlich, die durch eine stärkere Beteiligung der SPL an Intentionserkennung als an Emotionserkennung gekennzeichnet ist. Auch für die Amygdala zeigte sich eine vom zu erkennenden mentalen Zustand abhängige Aktivierung: Das Erkennen von Intentionen führte zu einem ähnlichen Abfall der Aktivität unter die Grundaktivität wie im MPFC. Dagegen war die Aktivierung durch die Emotionserkennung nahezu gleich stark wie die Aktivierung in der rechten TPJ. Eine knapp über der Grundaktivität gelegene Aktivierung der Amygdala erfolgte durch die Nicht-ToM-Bedingungen. Zusammenfassend zeigen die Regressionskoeffizienten, dass die beiden untersuchten ToM-Bedingungen, Intentions- und Emotionserkennung, von allen beteiligten Hirnarealen nur in der rechten und linken TPJ unabhängig vom mentalen Zustand zu jeweils der gleichen Aktivierung geführt haben. In allen anderen Hirnarealen hing die Aktivierungsstärke jeweilig vom zu erkennendem mentalen Zustand (Intention/Emotion) ab.

Räumliche Aktivitätsmaxima während Intentions- und Emotionserkennung

Bei der Untersuchung der räumlichen Aktivitätsmaxima während der ToM-Bedingungen zur Klärung der Frage nach spezifischer Aktivierung in der TPJ für bestimmte mentale Zustände zeigte sich nur in der linken TPJ ein signifikanter räumlicher Abstand zwischen den Aktivierungspeaks für Intentionserkennung und Emotionserkennung (**Abb. 19**) (**Tab. 13**). Die Koordinaten der individuellen Aktivierungspeaks für Intentionserkennung und Emotionserkennung sowie ihre räumlichen Abstände zueinander können der Tabelle im **Anhang 3** entnommen werden. Eine solch räumlich voneinander getrennte Aktivierung für die beiden untersuchten mentalen Zustände fand sich nicht in der rechten TPJ.

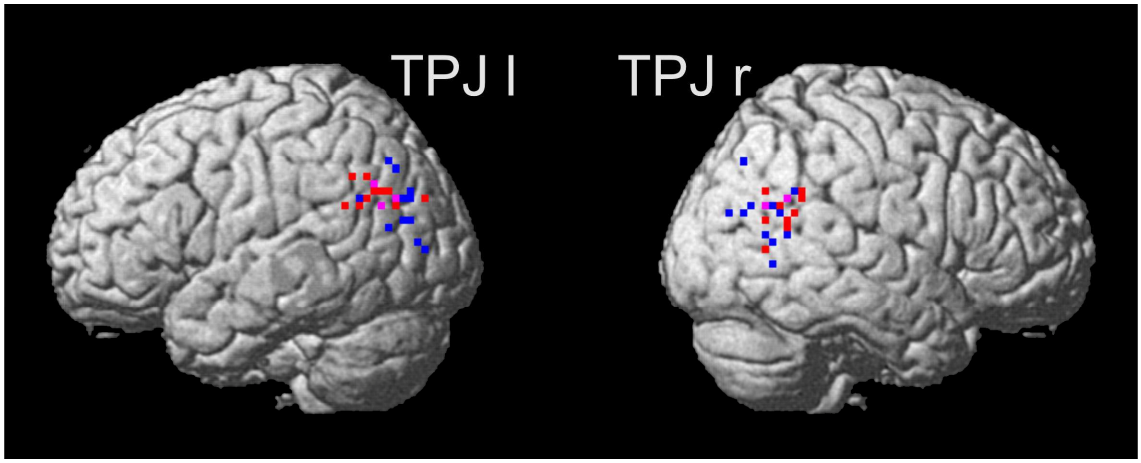

Abb. 19: Räumliche Verteilung der individuellen Aktivierungspeaks in der TPJ: Projektion der individuellen Aktivierungspeaks innerhalb eines Radius von 30 mm um den aktivsten Voxel der Gruppenanalyse in der linken und rechten temporo-parietalen Junktion auf ein gerendertes Gehirn. Die Aktivierungspeaks für Intentionserkennung sind blau, für Emotionserkennung rot. Alle Aktivierungspeaks haben mindestens ein Signifikanzniveau von t = 1,7 (TPJ l = linke temporo-parietale Junktion, TPJ r = rechte temporo-parietale Junktion)

Tab. 13: Verteilung der Aktivierungspeaks: Durchschnittliche Abstände der individuellen Peaks für Intentions- und Emotionserkennung innerhalb eines Radius von 30 mm und 15 mm um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen in der linken TPJ (8 = Mittelwert)

Radius um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen [mm]	**30**	**15**
Anzahl individueller Peaks innerhalb des Radius um den Gruppenpeak	12	4
8 Abstand zwischen den individuellen Peaks [mm]	21	10
8 Abstand auf der y-Achse [mm]	13	12
t-Wert	4,1	3,7

Bei der Untersuchung wurden die beiden Blöcke der jeweiligen ToM-Bedingung zusammengefasst betrachtet. Die räumliche Trennung der Aktivierungspeaks für die beiden ToM-Bedingungen könnte allerdings dadurch bedingt sein, dass bereits die Aktivierungspeaks während des ersten und zweiten Blocks der Intentionserkennung bzw. Emotionserkennung räumlich voneinander getrennt waren. Da in diesem Fall kein gemeinsamer Aktivierungspeak für den

ersten und zweiten Block der jeweiligen ToM-Bedingung vorhanden wäre, wären die räumlich voneinander getrennten Aktivierungspeaks für die beiden zusammengefassten Blöcke der jeweiligen ToM-Bedingung nicht die Folge einer selektiven Rekrutierung von innerhalb der Region um den Gruppenpeak beider ToM-Bedingungen liegenden Subregionen für einen bestimmten mentalen Zustand (Intentions-/Emotionserkennung). Vielmehr wäre es die Folge einer räumlich und zeitlich unterschiedlichen Rekrutierung von Subregionen während der Intentionserkennung und Emotionserkennung. Um sicher zu stellen, dass der räumliche Abstand zwischen den Aktivierungspeaks für Intentionserkennung und Emotionserkennung auf einer tatsächlichen räumlichen Trennung beruht, wurden die Abstände zwischen den Aktivierungspeaks für den ersten und zweiten Block der jeweiligen ToM-Bedingung untersucht und mit den Abständen der Aktivierungspeaks für die zusammengefassten Blöcke der jeweiligen ToM-Bedingung verglichen. Hierbei zeigten sich keine signifikanten räumlichen Unterschiede zwischen den Aktivierungspeaks für den ersten und zweiten Block der Intentionserkennung bzw. der Emotionserkennung. Allerdings war der Abstand zwischen den Aktivierungspeaks für die zusammengefassten Blöcke der Intentionserkennung und Emotionserkennung signifikant größer als die positiven Abstände auf der y-Achse zwischen den Aktivierungspeaks für den ersten und zweiten Block der Intentionserkennung (**Tab. 14**) bzw. der Emotionserkennung (**Tab. 15**), was für eine tatsächliche räumliche Trennung der Aktivierungspeaks spricht.

Tab. 14: Verteilung der Aktivierungspeaks für Intentionserkennungs-Blöcke: Durchschnittliche Abstände der individuellen Peaks für den ersten und zweiten Block der Intentionserkennung innerhalb eines Radius von 30 mm und 15 mm um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen in der linken TPJ (8 = Mittelwert)

Radius um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen [mm]	**30**	**15**
Anzahl individueller Peaks innerhalb des Radius um den Gruppenpeak	8	4
8 Abstand zwischen den individuellen Peaks [mm]	3	2
8 Abstand auf der y-Achse [mm]	9	11
t-Wert	3,9	3,4

Tab. 15: Verteilung der Aktivierungspeaks für Emotionserkennungs-Blöcke: Durchschnittliche Abstände der individuellen Peaks für den ersten und zweiten Block der Emotionserkennung innerhalb eines Radius von 30 mm und 15 mm um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen in der linken TPJ (8 = Mittelwert)

Radius um den Gruppenpeak für beide ToM-Bedingungen [mm]	**30**	**15**
Anzahl individueller Peaks innerhalb des Radius um den Gruppenpeak	9	3
8 Abstand zwischen den individuellen Peaks [mm]	-2	0
8 Abstand auf der y-Achse [mm]	5	7
t-Wert	2,1	1,6

Darüber hinaus blieb der Abstand zwischen den Aktivierungspeaks für Intentionserkennung und Emotionserkennung weiterhin signifikant, wenn nur die individuellen Aktivierungspeaks innerhalb eines Radius von 15 mm um den am stärksten aktivierten Voxel der Gruppenanalyse in der linken TPJ untersucht wurden (**Tab. 13**). Auch hier wurde zur Verifizierung des räumlichen Unterschieds der Aktivierungspeaks der Abstand zwischen den Peaks während des ersten und zweiten Blocks der jeweiligen ToM-Bedingung untersucht. Die in einem Radius von 15 mm um den Gruppenpeak liegenden Peaks für die zusammengefassten Blöcke der Intentionserkennung und Emotionserkennung waren signifikant weiter räumlich voneinander getrennt als die Aktivierungspeaks für den ersten und zweiten Block der Intentionserkennung (**Tab. 14**). Für die Emotionserkennung fanden sich nur bei drei Probanden signifikante Aktivierungspeaks innerhalb des Radius von 15 mm im ersten und zweiten Block, aber selbst bei diesen Probanden fand sich ein Trend zu größeren Abständen zwischen den Peaks für die zusammengefassten Blöcke der Intentions- und Emotionserkennung als zwischen dem ersten und zweiten Block der Emotionserkennung (**Tab. 15**).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass beim Erkennen von Intentionen und Emotionen zwei räumlich voneinander getrennte Regionen in der linken TPJ rekrutiert werden: eine mehr posterior gelegene Region während des Erkennens von Intentionen und eine mehr anterior gelegene Region während des Erkennens von Emotionen. Diese selektive Aktivierung von Subregionen

innerhalb der linken TPJ für die untersuchten mentalen Zustände ist auf die linke TPJ beschränkt. In der rechten TPJ finden sich keine räumlich voneinander getrennten Subregionen, die selektiv für einen mentalen Zustand rekrutiert werden – vielmehr gibt es eine identische Region, die ohne eine räumliche Unterscheidung der Aktivierungspeaks sowohl beim Erkennen von Intentionen als auch von Emotionen aktiv ist.

4 Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde die Aktivierung des ToM-Netzwerks im Gehirn während der Erkennung unterschiedlicher mentaler Zustände untersucht. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der Rolle der TPJ für die ToM. Die TPJ ist eine Region, die mit der Verarbeitung so unterschiedlicher Funktionen wie *attention reorienting* (Astafiev et al. 2006) (**siehe 1.2.3**), Körperwahrnehmung (Blanke und Arzy 2005), *sense of agency* (Ruby und Decety 2001) (**siehe 1.2.3**) sowie *action attribution* (Farrer und Frith 2002; Farrer et al. 2003) (**siehe 1.2.3**) assoziiert ist. Daher wird der Beitrag der TPJ an der ToM kontrovers diskutiert. Während vor allem Saxe und ihre Arbeitsgruppe von einer spezifischen Beteiligung der TPJ an der ToM ausgehen (Saxe und Kanwisher 2003; Saxe und Wexler 2005; Saxe und Powell 2006 a), sehen Mitchell (2008) sowie Decety und Lamm (2007) in der ToM nur einen Teilbereich, an dem die TPJ mitbeteiligt ist.

Das Verhalten des ToM-Netzwerkes im Gehirn während der Erkennung von Intentionen und Emotionen wurde in der vorliegenden Arbeit mit Kurzgeschichten in Form von Comics untersucht.

4.1 Aktivierung in der temporo-parietalen Junktion

Wie in vorangegangen Studien zeigte sich in der vorliegenden Arbeit eine stärkere bilaterale Aktivierung der TPJ beim Erkennen von mentalen Zuständen als beim Erkennen von physikalischen Kausalitäten. Dennoch lag auch die Aktivität der TPJ beim Erkennen von physikalischen Kausalitäten deutlich über der Ruheaktivität.

Die beobachtete TPJ-Aktivität sowohl für die ToM als auch für Aufgaben ohne die ToM, wie in diesem Fall das Erkennen von physikalischen Kausalitäten, steht im Einklang mit den Ergebnissen der Metaanalyse von Decety und Lamm (2007). Sie untersuchten die TPJ-Aktivierungen in 70 Studien zu ToM, *sense of agency* und *attention reorienting* (**siehe 1.2.3**). Die während der unterschiedlichen Aufgaben aktivierten Bereiche der TPJ wiesen Überlappungen auf

(Decety und Lamm, 2007). Dies deutet auf einen Bereich in der TPJ hin, der sowohl an ToM als auch an Aufgaben, die keiner sozialen Kognition bedürfen, beteiligt ist.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten darüber hinaus daraufhin, dass an Intentions- und Emotionserkennung räumlich unterschiedliche, aber spezifische Subregionen innerhalb der *linken TPJ* beteiligt sind. Denn die Untersuchung der räumlichen Verteilung der Aktivierungspeaks während Intentions- und Emotionserkennung weist eine signifikante Verschiebung der Aktivierungspeaks für Intentions- und Emotionserkennung von anterior nach posterior auf. Im Durchschnitt lagen die Aktivierungspeaks für Intentionserkennung auf der y-Achse 13 mm weiter posterior gegenüber den Aktivierungspeaks für Emotionserkennung. Diese räumliche Trennung der Aktivierungspeaks beider ToM-Bedingungen fehlte in der rechten TPJ.

Die in der rechten und linken TPJ jeweils gleich starke Aktivierung während der Intentions- und Emotionserkennung lässt eine allgemeine Beteiligung an der ToM vermuten, die unabhängig vom zu erkennendem mentalen Zustand ist. Allerdings wurde in früheren ToM-Studien unterschiedliche Aktivierung in der TPJ beobachtet, sodass kein klares Aktivierungsmuster für die TPJ bei ToM-Aufgaben zu bestehen scheint. ToM-Studien berichten von bilateraler und unilateraler TPJ-Aktivierung während dem Erkennen eines mentalen Zustandes (**siehe Anhang 1**). Sogar die Ergebnisse von Studien, die das Erkennen derselben mentalen Zustände mit teilweise ähnlichen oder sogar identischen Stimuli untersuchten, zeigten unterschiedliche Aktivierung in der TPJ. Jedoch berichtet die Mehrheit der ToM-Studien von bilateraler Aktivierung in der TPJ für das Erkennen der unterschiedlichsten mentalen Zustände. Nur die wenigsten Studien berichten von unilateraler Aktivierung in der rechten TPJ, und noch weniger in der linken TPJ.

Die unterschiedliche Aktivität in der TPJ lässt einen Unterschied zwischen der rechten und der linken TPJ vermuten. Die Ergebnisse früherer ToM-Studien haben bereits zu der Annahme geführt, dass die rechte TPJ immer bei einer Diskrepanz zwischen dem eigenen mentalen Zustand und dem mentalen Zu-

stand einer anderen Person aktiv ist (Perner et al. 2006; Sommer et al. 2007). Die linke TPJ ist dagegen immer dann aktiv, wenn Aussagen ohne Bezug zu ToM nicht mit den eigenen Erwartungen oder der Realität übereinstimmen (Perner et al. 2006; Saxe und Wexler 2005). Die vorliegenden Ergebnisse geben Anlass zu der Annahme, dass die rechte TPJ an der Verarbeitung von Diskrepanzen jeglicher Art beteiligt ist, wobei unterschiedliche Diskrepanzen wie z. B. verschiedene mentale Zustände nicht zur Aktivierung von räumlich voneinander getrennten Subregionen innerhalb der rechten TPJ führen. Die linke TPJ dagegen besitzt ein spezialisiertes Netzwerk, das unterschiedliche, räumlich voneinander getrennte Subregionen zur Verarbeitung von Diskrepanzen verwendet. Diese Diskrepanzen schließen alle Situationen mit ein, die nicht mit den eigenen Erwartungen oder der Realität übereinstimmen – unabhängig davon, ob diese Diskrepanzen soziale oder nicht-soziale Aufgaben betreffen.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen vermuten, dass die rechte TPJ leichter als die linke aktiviert wird und deswegen immer bei einer Diskrepanz bezüglich eines mentalen Zustandes oder einer nicht-mentalen Aussage aktiv ist. Nur wenn die Aktivierung stark genug ist, wird auch das spezialisierte Netzwerk in der linken TPJ aktiv. Sowohl die beiden in der vorliegenden Arbeit untersuchten ToM-Bedingungen als auch die Nicht-ToM-Bedingungen konfrontierten die Probanden mit einer Diskrepanz zwischen ihren Erwartungen und der in den Comics präsentierten Realität. Diese Diskrepanzen führen zur schrittweisen Aktivierung der TPJ, wie die Regressionskoeffizienten (**Abb. 18**) zeigen: Während in der rechten TPJ die Aktivierung bei den Nicht-ToM-Bedingungen bereits über der Grundaktivität lag und bei beiden ToM-Bedingungen im gleichen Maße noch weiter zunahm, zeigte die linke TPJ bei den Nicht-ToM-Bedingungen eine knapp unterhalb der Grundaktivität gelegene Aktivierung und nur bei den ToM-Bedingungen eine gleich starke Aktivierung über der Grundaktivität, die jedoch schwächer war als in der rechten TPJ. Die unterschiedlich starken Aktivierungen zwischen den ToM- und Nicht-ToM-Bedingungen deuten darauf hin, dass bei den ToM-Bedingungen eine größere Diskrepanz als bei den Nicht-ToM-Bedingungen erzeugt wird. Die insgesamt schwächere Aktivierung in der linken TPJ zeigt ihre höhere Aktivierungsschwelle. Zudem demonstrieren die vorlie-

genden Ergebnisse ein spezialisiertes Netzwerk innerhalb der linken TPJ mit räumlich voneinander getrennten Subregionen, die spezifisch auf Intentionserkennung oder Emotionserkennung reagieren. In der rechten TPJ fehlt so ein spezialisiertes Netzwerk mit räumlich unterschiedlichen Subregionen für einen mentalen Zustand.

Zusammenfassend scheint die rechte TPJ allgemein auf alle auftauchenden Diskrepanzen zu reagieren, ohne dabei die Ursache zu unterscheiden. Die linke TPJ dagegen scheint nicht nur auf größere Diskrepanzen zu reagieren, sondern scheint auch spezialisierte Bereiche zur Differenzierung der mentalen Zustände zu besitzen, welche die Diskrepanzen verursachen.

Die vorliegenden Ergebnisse werden durch die Beobachtungen vorangegangener ToM-Studien unterstützt. Wie bereits erwähnt, berichten die meisten ToM-Studien (**siehe Anhang 1**) von bilateraler TPJ-Aktivierung bei ToM-Aufgaben. Diese Studien konfrontierten ihre Probanden mit unterschiedlichen Diskrepanzen. Entweder stimmten, wie in der vorliegenden Arbeit, die Erwartungen der Probanden nicht mit der präsentierten Realität überein (z. B. Ciaramidaro et al. 2007, Walter et al. 2004) oder die Erwartungen der in den Stimuli vorkommenden Personen stimmten nicht mit der in den Stimuli präsentierten Realität überein (z. B. Gallagher et al. 2000, Hynes et al. 2006). Auch durch die Auswahl eines Adjektivs aus einer Gruppe von Adjektiven zur Beschreibung einer präsentierten Situation wurden Probanden mit Diskrepanzen konfrontiert, da nur eines der Adjektive die Situation passend beschrieb (z. B. Ruby und Decety 2004). Gemäß der Annahme der vorliegenden Arbeit hat in all den ToM-Studien mit bilateraler TPJ-Aktivität die rechte TPJ unabhängig von einer Ursache unspezifisch Diskrepanzen entdeckt. Dagegen kam das spezialisierte Netzwerk in der linken TPJ bei der Differenzierung spezifischer, die Diskrepanzen verursachender mentaler Zustände zur Anwendung.

4.2 Aktivierung im medialen präfrontalen Kortex

Der mediale präfrontale Kortex (MPFC), insbesondere der paracinguläre Kortex (PCC), zeigte beim Erkennen von Emotionen eine Aktivierung. Während

des Erkennens von Intentionen war der MPFC nicht aktiv. Demnach scheint der MPFC eine Komponente bei der Verarbeitung beim Erkennen von Emotionen zu sein. Gestützt wird dieses Ergebnis durch die Beobachtung anderer Studien zur Beteiligung des MPFC an Emotionen und ihrer Verarbeitung. In einer Metaanalyse von 330 Studien zur Lokalisierung von kognitiven Funktionen (z. B. das Überwachen von Aufmerksamkeit und Fehlern) und emotionalen Funktionen (z. B. das Beurteilen der emotionalen Wirkung eines Bildes) im präfrontalen Kortex assoziierten Steele und Lawrie (2004) die Aktivierung bei Aufgaben mit Emotionen hauptsächlich mit dem anterioren rostralen MFC (**Abb. 5**) des MPFC und dem dazugehörenden paracingulären Kortex. Kognitive Funktionen assoziierten sie mit dem posterioren rostralen MFC (**Abb. 5**). Die funktionelle Aufteilung des MPFC in Abschnitte zur Verarbeitung von kognitiven und emotionalen Aufgaben haben bereits Bush et al. (2000) in einem Review zum Einfluss dieser Funktionen auf den MPFC beschrieben.

Bei einem Vergleich der Hirnaktivität von Probanden, welche die Intentionen und Emotionen der Hauptcharaktere mit denselben Stimuli wie in dieser Arbeit erkennen sollten, beobachteten Völlm et al. (2006) ebenfalls Aktivierung im MPFC beim Erkennen von Emotionen. Auch Ochsner et al. (2004) beobachteten in einer Studie Aktivität im MPFC beim Erkennen von Emotionen: Sie zeigten Probanden Bilder aus dem International Affective Picture System (IAPS), einer Bildersammlung zur Untersuchung von Emotionen und Aufmerksamkeit (Lang et al. 2008). Die Probanden sollten in einer Bedingung entscheiden, ob sie sich gut, unwohl oder neutral beim Betrachten der präsentierten Bilder fühlten. In einer zweiten Bedingung sollten die Probanden entscheiden, ob die zentrale Figur des Bildes sich in der dargestellten Situation gut, unwohl oder neutral fühlt. Der MPFC war sowohl beim Erkennen der Emotion der Figur aus den Bildern als auch beim Nachdenken über die eigene Emotion aktiv.

Frith und Frith (2006) kommen in einem Review über die ToM zu dem Schluss, dass beim Nachdenken über Emotionen der Selbstbezug eine starke Rolle spielt. Dabei findet die Verarbeitung dieses Selbstbezugs hauptsächlich im anterioren rostralen MFC statt (Frith und Frith 2006). Die nur beim Erkennen von Emotionen beobachtete Aktivität des MPFC in der vorliegenden Arbeit lässt

demnach vermuten, dass beim Erkennen von Emotionen das Reflektieren der eigenen Emotionen in der dargestellten Situation notwendig ist, da dieselbe Situation je nach Einstellung und Erfahrungen von Personen unterschiedliche Emotionen hervorrufen kann. Somit kann das Reflektieren der eigenen Emotionen als Anhaltspunkt dafür dienen, wie sich eine andere Person in einer bestimmten Situation fühlt. Beim Erkennen von Intentionen scheint ein Selbstbezug nicht notwendig zu sein, da die Handlungen einer Person immer ein eindeutiges Ziel verfolgen, das durch logische Schlussfolgerungen aus den Handlungen erkannt werden kann. Die vorliegenden Ergebnisse lassen darüber hinaus vermuten, dass der MPFC Teil des Netzwerkes ist, das spezifisch am Erkennen von Emotionen beteiligt ist.

4.3 Aktivierung im Precuneus

Der Precuneus war für die beiden ToM-Bedingungen stärker aktiv als für die Nicht-ToM-Bedingungen. Auch im direkten Vergleich der einzelnen ToM-Bedingungen mit den Nicht-ToM-Bedingungen zeigte der Precuneus stärkere Aktivierung für Intentions- und Emotionserkennung.

Das vorliegende Ergebnis lässt vermuten, dass bei der Verarbeitung von ToM der Precuneus unabhängig von einem spezifischen mentalen Zustand herangezogen wird. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse früherer Studien unterstützt (**siehe Anhang 1**). Aktivierung im Precuneus zeigte sich dabei nicht nur beim Erkennen von Intentionen und Emotionen, sondern auch bei *false beliefs* und Gedanken sowie bei kombinierten Aufgaben mit Emotionen und Wissen. Die Beteiligung des Precuneus an der ToM scheint darüber hinaus von der Modalität der Stimuli unabhängig zu sein; Aktivität im Precuneus berichteten Studien mit Text-Stimuli sowie Bild-Stimuli (**siehe Anhang 1**). Der Precuneus zeigt nicht nur eine Beteiligung beim Erkennen unterschiedlicher mentaler Zustände anderer Personen (**siehe Anhang 1**), sondern auch beim Nachdenken über die eigenen mentalen Zustände (Ruby und Decety, 2003; Ochsner et al., 2004; den Ouden et al., 2005).

Cavanna und Trimble (2006) gehen in einem Review zum Precuneus davon aus, dass bei der Verarbeitung von ToM der Precuneus Strategien der bildlichen Vorstellung heranzieht und aus dem episodischen Gedächtnis persönliche Erfahrungen abruft.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen darüber hinaus vermuten, dass der Precuneus bei der Verarbeitung von ToM auch auf das Bewusstsein sowie das *self-processing* zurückgreift. Obwohl die zwei Ausgangsmöglichkeiten der präsentierten Comics in zwei Bildern dargestellt wurden, bedurfte das Erkennen der mentalen Zustände der Comicfiguren, besonders von Intentionen, Strategien der bildlichen Vorstellung, um zu verifizieren, ob Handlungen der Comicfigur möglich sind und Sinn ergeben, und um sich vorstellen zu können, was zwischen den drei Bildern zu Beginn und den beiden alternativen Abschlussbildern passiert sein könnte. Das zusätzliche Abrufen persönlicher Erfahrungen aus dem episodischen Gedächtnis beim Erkennen der mentalen Zustände der Comicfiguren, besonders von Emotionen zum Vergleich der präsentierten Situation mit ähnlichen persönlich erlebten Situationen, könnte zu einem besseren Verständnis des mentalen Zustandes der Comicfigur in der präsentierten Situation führen. Die Aktivierung im Precuneus scheint dabei durch das *self-processing* zu einer klaren Trennung zwischen dem eigenen mentalen Zustand und dem mentalen Zustand der Comicfigur beizutragen. Diese Annahme wird durch die Beobachtung unterstützt, dass der Precuneus nicht nur am Erkennen unterschiedlicher mentaler Zustände anderer Personen beteiligt ist (**siehe Anhang 1**), sondern auch am Nachdenken über die eigenen mentalen Zustände (Ruby und Decety, 2003; Ochsner et al., 2004; den Ouden et al., 2005).

Es ist jedoch unklar, weshalb Völlm et al. (2006) in keiner ihrer Bedingungen Aktivität im Precuneus beobachtet haben, obwohl dieselben Stimuli verwendet wurden.

4.4 Aktivierung im Lobus parietalis superior

Der rechte Lobus parietalis superior (SPL) zeigte Aktivierung für das Erkennen von Intentionen. Der SPL wurde in früheren ToM-Studien noch nicht mit der

ToM assoziiert. Vielmehr scheint der SPL an der Rekonfiguration der Aufmerksamkeit in unterschiedlichen sensorischen Bereichen beteiligt zu sein und Informationen über die räumliche Beziehung beider Arme sowie über die Gestalt eines mit den Händen gehaltenen Objekts zu integrieren (**siehe 1.2.3**). Die Beteiligung an der Intentionserkennung bleibt unklar.

4.5 Aktivierung in der Amygdala

Die linke Amygdala zeigte Aktivierung beim Erkennen von Emotionen. Während die Beteiligung der Amygdala an der Verarbeitung von Emotionen unbestritten ist, ist ihre Rolle bei der ToM noch nicht geklärt. In einem Review zu ToM-Studien fanden Gallagher und Frith (2003) nur eine Studie, die von Aktivierung in der Amygdala berichtete. In dieser Studie von Baron-Cohen (1999) sollten Probanden aus dem Augenausdruck anderer Personen deren Emotionen erkennen. Gallagher und Frith (2003) betonten, dass die Aktivität der Amygdala auf der Verarbeitung der Blickrichtung oder auf dem Erkennen emotionalen Verhaltens beruhen könne. Jedoch wurde in einer neueren ToM-Studie eine Aktivierung in der Amygdala beim Erkennen von Emotionen beobachtet: Probanden sollten darüber nachdenken, welche Emotionen die ihnen präsentierten Sätze in ihnen selbst und in ihrer Mutter auslösen könnten (Ruby und Decety 2004). Die Amygdala war dabei unabhängig davon aktiv, ob die Probanden über die eigenen Emotionen oder die ihrer Mutter nachdachten. Aktivierung in der Amygdala wurde auch von Völlm et al. (2006) beim Erkennen von Emotionen beobachtet. Doch nicht in allen ToM-Studien zum Erkennen von Emotionen wird von einer Aktivierung in der Amygdala berichtet (Hynes et al., 2006; Ochsner et al., 2004; Lamm et al., 2007). Das Fehlen einer Amygdala-Aktivität beim Erkennen von Intentionen und die nur in drei ToM-Studien zur Erkennung von Emotionen berichtete Aktivierung lässt eine allgemeine Beteiligung der Amygdala an der ToM unwahrscheinlich erscheinen. Zur Klärung der Frage, welche Rolle die Amygdala bei der Erkennung von Emotionen in ToM-Aufgaben spielt, sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit unterstützen die Annahme, einer allgemeinen Beteiligung der TPJ und des Precuneus an ToM-Prozessen unabhängig vom zu erkennenden mentalen Zustand. Weiterhin zeigen die Ergebnisse eine Beteiligung des SPL an Intentionserkennung und des MPFC und der Amygdala an Emotionserkennung. Die vorliegenden Ergebnisse unterstützen nicht nur die kontrovers diskutierte Rolle der TPJ als ein für ToM selektives Hirnareal, sondern lassen darüber hinaus auch eine Aufgabenteilung bei der ToM vermuten: Während die rechte TPJ im Allgemeinen an ToM beteiligt ist, ohne auf einen bestimmten mentalen Zustand zu achten, zeigt die linke TPJ auch eine spezifische Aktivierung für Intentions- und Emotionserkennung in räumlich voneinander getrennten Subregionen.

Dies wirft die Frage auf, ob auch für andere mentale Zustände spezifische Subregionen innerhalb der an ToM beteiligten TPJ-Region vorhanden sind. Zur Klärung dieser Frage sind weitere Untersuchungen nötig, in denen die Verarbeitung unterschiedlicher mentale Zustände miteinander verglichen wird. Weitere spezifische Subregionen für die Verarbeitung bestimmter mentaler Zustände würde die Vermutung einer selektiven TPJ Beteiligung an ToM erhärten.

6 Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ANOVA	analysis of variance
arMFC	anteriorer rostraler medialer Frontalkortex
BOLD	blood oxygen level dependent
BA	Brodmann Areal
bzw.	beziehungsweise
CBF	cerebral blood flow
CBV	cerebral blood volume
CT	Computertomografie
EEG	Elektroenzephalografie
EPI	Echo Planar Imaging
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
FWHM	full width at half maximum
GLM	Generelles Lineares Modell
HRF	hemodynamic response function
Hz	Hertz
IAPS	International Affective Picture System
MEG	Magnetenzephalografie
MFC	medialer Frontalkortex
min	Minute
mm	Millimeter
MNI	Montreal Neurological Institute
MPFC	medialer präfrontaler Kortex
MPRAGE	magnetization prepared rapid gradient echo
MR-Signal	Magnetresonanzsignal
ms	Millisekunde

oMFC	orbitaler medialer Frontalkortex
PET	Positronen-Emissionstomografie
Phys 1	physikalische Kausalitäten, 1 Person
Phys 2	physikalische Kausalitäten, 2 Personen
prMFC	posteriorer rostraler medialer Frontalkortex
RGB	rot, grün, blau
s	Sekunde
SPM	statistical parametric map
STS	Sulcus temporalis superior
T	Tesla
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TI	Inversionszeit
ToM	Theory of Mind
TPJ	temporo-parietale Junktion
TR	Repetitionszeit
VGA	Video Graphics Array
vs.	versus
ZNS	zentrales Nervensystem

7 Abbildungen

Seite

Abb. 1: Sally-Ann Aufgabe
Adolphs, R. (2003)
Cognitive neuroscience of human social behaviour
Nat Rev Neurosci , 4, 165 – 178 4

Abb. 2: Das Verhalten von Personen deuten
Amodio, D. M., Frith, C. D. (2006)
Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition
Nat Rev Neurosci, 7, 268 – 277 5

Abb. 3: Theory-Theory
Modifiziert nach:
Apperly, I. A. (2008)
Beyond Simulation-Theory and Theory-Theory: why social cognitive neuroscience should use its own concepts to study “theory of mind”
Cognition, 107, 266 – 283 6

Abb. 4: Simulation-Theory
Modifiziert nach:
Apperly, I. A. (2008)
Beyond Simulation-Theory and Theory-Theory: why social cognitive neuroscience should use its own concepts to study “theory of mind”
Cognition, 107, 266 – 283 7

Abb. 5: Anatomische Aufteilung des MPFC in drei funktionale Abschnitte
Amodio, D. M., Frith, C. D. (2006)
Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition
Nat Rev Neurosci, 7, 268 – 277 16

Abb. 6: Hemodynamic response function (HRF)
Amaro, E., Jr., Barker, G. J. (2006)
Study design in fMRT: Basic principles
Brain Cogn, 60, 220 – 232 23

Abb. 7: Comic aus der Kategorie Intentionserkennung..... 32

Abb. 8: Comic aus der Kategorie Emotionserkennung 33

Abb. 9: Comic aus der Kategorie physikalische Kausalitäten mit einer Person 34

Abb. 10: Comic aus der Kategorie physikalische Kausalitäten mit zwei Personen 35

Abb. 11: Präsentation der Comics 38

Abb. 12: Zeitlicher Ablauf eines Blocks 39

Abb. 13: Zeitlicher Ablauf eines gesamten Versuchsdurchlaufs 40

Abb. 14: Hirnaktivität bei ToM-Bedingungen im Vergleich zu Nicht-ToM-Bedingungen. 54

Abb. 15: Hirnaktivität beim Erkennen von Intentionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten (Phys 1 und Phys 2) 55

Abb. 16: Hirnaktivität beim Erkennen von Emotionen im Vergleich zu physikalischen Kausalitäten (Phys 1 und Phys 2) 56

Abb. 17: Hirnaktivität bei ToM-Bedingungen 57

Abb. 18: Regressionskoeffizienten (parameter estimates) 59

Abb. 19: Räumliche Verteilung der individuellen Aktivierungspeaks in der TPJ 62

8 Tabellen

Seite

Tab. 1: Auswahl an ToM-Studien mit Aktivierungen in mit der ToM assoziierten Hirnarealen 9

Tab. 2: Probandenkollektiv 29

Tab. 3: Einleitungsfragen für die einzelnen Blöcke 36

Tab. 4: Parameter der morphologischen Messung 41

Tab. 5: Parameter der funktionellen Messung 42

Tab. 6: Kontraste für den Haupteffekt von ToM, den differenzierten Effekt und den einfachen Haupteffekt für die einzelnen ToM-Bedingungen 50

Tab. 7: Task Performance 52

Tab. 8: Hirnaktivität für ToM im Vergleich zu Nicht-ToM 54

Tab. 9: Hirnaktivität für Intentionserkennung im Vergleich zu den Nicht-ToM-Bedingungen 55

Tab. 10: Hirnaktivität für Emotionserkennung im Vergleich zu den Nicht-ToM-Bedingungen 56

Tab. 11: Hirnaktivität für Intentionserkennung im Vergleich zu Emotionserkennung 58

Tab. 12: Hirnaktivität für Emotionserkennung im Vergleich zu Intentionserkennung 58

Tab. 13: Verteilung der Aktivierungspeaks 62

Tab. 14: Verteilung der Aktivierungspeaks für Intentionserkennungs-Blöcke 63

Tab. 15: Verteilung der Aktivierungspeaks für Emotionserkennungs-Blöcke 64

9 Literatur

Adolphs, R. (2003)
Cognitive neuroscience of human social behaviour
Nat Rev Neurosci, 4, 165 – 178

Adolphs, R. (2006)
How do we know the minds of others? Domain-specificity, simulation, and enactive social cognition
Brain Res, 1079, 25 – 35

Allison, T., Puce, A., McCarthy, G. (2000)
Social perception from visual cues: role of the STS region
Trends Cogn Sci, 4, 267 – 278

Amaro, E., Jr., Barker, G. J. (2006)
Study design in fMRT: Basic principles
Brain Cogn, 60, 220 – 232

Amodio, D. M., Frith, C. D. (2006)
Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition
Nat Rev Neurosci, 7, 268 – 277

Apperly, I. A. (2008)
Beyond Simulation-Theory and Theory-Theory: why social cognitive neuroscience should use its own concepts to study “theory of mind”
Cognition, 107, 266 – 283

Astafiev, S. V., Shulman, G. L., Corbetta, M. (2006)
Visuospatial reorienting signals in the human temporo-parietal junction are independent of response selection
Eur J Neurosci, 23, 591 – 596

Bandettini, P. A., Cox, R. W. (2000)
Event-related fMRT contrast when using constant interstimulus interval: theory and experiment
Magn Reson Med, 43, 540 – 548

Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., Frith, U. (1985)
Does the autistic child have a “theory of mind”?
Cognition, 21, 37 – 46

Baron-Cohen, S., Ring, H. A., Wheelwright, S., Bullmore, E. T., Brammer, M. J., Simmons, A., Williams, S. C. (1999)
Social intelligence in the normal and autistic brain: an fMRT study
Eur J Neurosci, 11, 1891 – 1898

Beer, J. S., Ochsner, K. N. (2006)
Social cognition: A multi level analysis
Brain Res, 1079, 98 – 105

Berne, R. M., Levy, M. N. (1993)
Physiology – International edition
2. Auflage, Mosby, St. Louis

Blair, R. J. R., Morris, J. S., Frith, C. D., Perret, D. I., Dolan R. J. (1999)
Dissociable neural responses to facial expressions of sadness and anger
Brain, 122, 883 – 893

Blakemore, S. J. (2008)
The social brain in adolescence
Nat Rev Neurosci, 9, 267 – 277

Blanke, O., Arzy, S. (2005)
The out-of-body experience: disturbed self-processing at the temporo-parietal junction
Neuroscientist, 11, 16 – 24

Bonda, E., Petrides, M., Ostry, D., Evans, A. (1996)
Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion
J Neurosci, 16, 3737 – 3744

Bortz, J. (2005)
Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.
6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Breiter, H. C., Etcoff, N. L., Whalen, P. J., Kennedy, W. A., Rauch, S. L., Buckner, R. L., Strauss, M. M. Hyman, S. E., Rosen, B. R. (1996)
Response and habituation of the human amygdala during visual processing of facial expression
Neuron, 17, 875 – 887

Brunet, E., Sarfati, Y., Hardy-Bayle, M.-C., Decety, J. (2000)
A PET investigation of the attributions of intentions with a non-verbal task
Neuroimage, 11, 157 – 166

Bush, G., Luu, P., Posner, M. I. (2000)
Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex
Trends Cogn Sci, 4, 215 – 222

Castelli, F., Happe, F., Frith, U., Frith, C. (2000)
Movement and mind: a functional imaging study of perception and interpretation of complex intentional movement patterns
Neuroimage, 12, 314 – 325

Cavanna, A. E., Trimble, M. R. (2006)
The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates
Brain, 129, 564 – 583

Chiu, Y. C., Yantis, S. (2009)
A domain-independent source of cognitive control for task sets: shifting spatial attention and switching categorization rules
J Neurosci, 29, 3930 – 3938

Ciaramidaro, A., Adenzato, M., Enrici, I., Erk, S., Pia, L., Bara, B. G., Walter, H. (2007)
The intentional network: How the brain reads varieties of intentions
Neuropsychologia, 45, 3105 – 3113

Decety, J., Grèzes, J. (2006)
The power of simulation: imagining one's own and other's behavior
Brain Res, 1079, 4 – 14

Decety, J., Lamm, C. (2007)
The role of the right temporoparietal junction in social interaction: how low-level computational processes contribute to meta-cognition
Neuroscientist, 13, 580 – 593

De Ridder, D., Van Laere, K., Dupont, P., Menovsky, T., Van de Heyning, P. (2007)
Visualizing out-of-body experience in the brain
N Engl J Med, 357, 1829 – 1833

Den Ouden, H. E., Frith, U., Frith, C., Blakemore, S. J. (2005)
Thinking about intentions
Neuroimage, 28, 787 – 796

Esterman, M., Chiu, Y. C., Tamber-Rosenau, B. J., Yantis, S. (2009)
Decoding cognitive control in human parietal cortex
Proc Natl Acad Sci USA, online Veröffentlichung vor Druckausgabe am 05.10.09

Farrer, C., Frith, C. D. (2002)
Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: the neural correlates of the experience of agency
Neuroimage, 15, 596 – 603

Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., Jeannerod, M. (2003)
Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study
Neuroimage, 18, 324 – 333

Ferstl, E. C., von Cramon, D. Y. (2002)
What does the frontomedian cortex contribute to language processing: coherence or theory of mind?
Neuroimage, 17, 1599 – 1612

Fletcher, P. C., Frith, C. D., Baker, S. C., Shallice, T., Frackowiak, R. S., Dolan, R. J. (1995 a)
The mind's eye – precuneus activation in memory related imagery
Neuroimage, 2, 195 – 200

Fletcher, P. C., Happe, F., Frith, U., Baker, S. C., Dolan, R. J., Frackowiak, R. S., Frith, C. D. (1995 b)
Other minds in the brain: a functional imaging study of "theory of mind" in story comprehension
Cognition, 57, 109 – 128

Fox, P. T., Raichle, M. E. (1986)
Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects
Proc Natl Acad Sci USA, 83, 1140 – 1144

Fransson, P., Kruger, G., Merboldt, K. D., Frahm, J. (1998)
Temporal characteristics of oxygenation-sensitive MRI responses to visual activation in humans
Magn Reson Med, 39, 912 – 919

Friston, K. J., Josephs, O., Rees, G., Turner, R. (1998)
Nonlinear event-related responses in fMRI
Magn Reson Med, 39, 41 – 52

Frith, C. D., Frith, U. (1999)
Interacting Minds – A biological basis
Science, 286, 1692 – 1695

Frith, U., Frith, C. D. (2003)
Development and neurophysiology of mentalizing
Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 358, 495 – 473

Frith, C. D., Frith, U. (2006)
The neural basis of mentalizing
Neuron, 50, 531 – 534

Frith, C. D. (2007)
The social brain?
Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 362, 671 – 678

Gallagher, H. L., Happé, F., Brunswick, N., Fletcher, P. C., Frith, U., Frith, C. D. (2000)
Reading the mind in cartoons and stories: an fMRT study of 'theory of mind' in verbal and non-verbal tasks
Neuropsychologia, 38, 11-21

Gallagher, H. L., Frith, C. D. (2003)
Functional imaging of 'theory of mind'
Trends Cog Sci, 7, 77 – 83

German, T. P., Niehaus, J. L., Roarty, M. P., Giesbrecht, B., Miller, M. B. (2004)
Neural correlates of detecting pretense: automatic engagement of the intentional stance under covert conditions
J Cogn Neurosci, 16, 1805 – 1817

Gilbert, S. J., Spengler, S., Simons, J. S., Steele, J. D., Lawrie, S. M., Frith, C. D., Burgess, P. W. (2006)
Functional specialization within rostral prefrontal cortex (area 10): a meta-analysis
J Cogn Neurosci, 18, 932 – 948

Gobbini, M. I., Koralek, A. C., Bryan, R. E., Montgomery, K. J., Haxby, J. V. (2007)
Two takes on the social brain: a comparison of theory of mind tasks
J Cog Neurosci, 19, 1803 – 1814

Gordon, R. (1986)
Folk psychology as simulation
Mind and Language, 1, 158 – 170

Grèzes, J., Costes, N., Decety, J. (1998)
Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: A PET investigation
Cogn Neuropsychol, 15, 553 – 582

Grèzes, J., Frith, C. D., Passingham, R. E. (2004 a)
Inferring false beliefs from the actions of oneself and others: an fMRI study
Neuroimage, 21, 744 – 750

Grèzes, J., Frith, C., Passingham, R. E. (2004 b)
Brain mechanisms for inferring deceit in the actions of others
J Neurosci, 24, 5500 – 5505

Gusnard, D. A., Akbudak, E., Shulman, G. L., Raichle, M. E. (2001)
Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function
Proc Natl Acad Sci USA, 98, 4259 – 4264

Heal, J. (1986)
Replication and functionalism
In Butterfield, J. (Herausgeber)
Language, mind and logic
Cambridge Universtiy Press, Cambridge

Hogrefe, G. J., Wimmer, H., Perner, J. (1986)
Ignorance versus false belief – a developmental lag in attribution of epistemic states
Child Dev, 57, 567 – 582

Hynes, C. A., Baird, A. A., Grafton, S. T. (2006)
Differential role of the orbital frontal lobe in emotional versus cognitive erspective-taking
Neuropsychologia, 44, 374 – 383

Janz, C., Speck, O., Henning, J. (1997)
Time-resolved measuremant of brain activation after a short visual stimulus: new results on the physiological mechanisms of the cortical response
NMR Biomed, 10, 222 – 229

Johnsons, S. C. (2003)
Detecting Agents
Phil Trans R Soc Lond B Biol Sci, 358, 549 – 559

Kelley, T., Serences, J., Giesbrecht, B., Yantis, S. (2008)
Cortical mechanisms for shifting and holding visuospatial attention
Cereb Cortex, 18, 114 – 125

Klose, U., Erb, M., Wildgruber, D., Müller, E., Grodd, W. (1999)
Improvement of the acquisiton of a large amount of MR images on a conventional whole body system
Mag Reson Imaging, 17, 471 – 474

Lamm, C., Batson, C. D., Decety, J. (2007)
The neural substrate of human empathy: effects of perspective-taking and cognitive appraisal
J Cogn Neurosci, 19, 42 – 58

Lane, R. D., Fink, G. R., Chau, P. M., Dolan, R. J. (1997)
Neural activation during selective attention to subjective emotional responses
Neuroreport, 8, 3969 – 3972

Lang, P. J., Bradley, M. M., Cuthbert, B. N. (2008)
International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual
Technical Report A-8, University of Florida, Gainesville, FL

Liu, T. Slotnik, S., Serences, J., Yantis, S. (2003)
Cortical mechanisms of feature-based attentional control
Cereb Cortex, 13, 1334 – 1343

Logothetis, N. K. (2002)
The neural basis of the blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging signal
Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 357, 1003 - 1037

Logothetis, N. K., Wandell, B. A. (2004)
Interpreting the BOLD Signal
Annu Rev Physiol, 66, 735 – 769

Maguire, E. A., Mummery, C. J. (1999)
Differential modulation of a common memory retrieval network revealed by positron emission tomography
Hippocampus, 9, 54 – 61

Maguire, E. A., Mummery, C. J., Buchel, C. (2000)
Patterns of hippocampal-cortical interaction dissociate temporal lobe memory subsystems
Hippocampus, 10, 475 – 482

Malonek, D., Dirnagl, U., Lindauer, U., Yamada, K., Kanno, I., Grinvald, A. (1997)
Vascular imprints of neuronal activity: relationships between the dynamics of cortical blood flow, oxygenation and volume changes following sensory stimulation
Proc Natl Acad Sci USA, 94, 14826 – 14831

Malonek, D., Grinvald, A. (1996)
Interactions between electrical activity and cortical microcirculation revealed by imaging spectroscopy: implications for functional brain mapping
Science, 272, 551 – 554

Mansfield, P. (1977)
Multi-planar image formation using NMR spin echoes
J Phys C: Solid State Phys, 10, L55 – L58

Menon, R. S., Ogawa, S., Hu, X., Strupp, J. P., Anderson , P, Ugurbil, K. (1995)
BOLD based functional MRI at 4 Tesla includes a capillary bed contribution: echo-planar imaging correlates with previous optical imaging using intrinsic signals
Mag Reson Med, 33, 453 – 459

Mitchell, J. P., Banaji, M. R., Macrae, C. N. (2005)
The link between social cognition and self-referential thought in the medial prefrontal cortex
J Cogn Neurosci, 17, 1306 – 1315

Mitchell, J. P. (2008)
Activity in right temporo-parietal junction is not selective for theory-of-mind
Cereb Cortex, 18, 262 – 271

Morris, J. S., Frith, C. D., Perret, D. I., Rowland, D., Young, A. W., Calder, A. J., Dolan, R. J. (1996)
A differential neural response in the human amygdala to fearful and happy facial expressions
Nature, 383, 812 – 815

Naito, E., Scheperjans, F., Eickhoff, S. B., Amunts, K., Roland, P. E., Zilles, K., Ehrsson, H. H. (2008)
Human superior parietal lobule is involved in somatic perception of bimanual interaction with an external object
J Neurophysiol, 99, 695 – 703

Nakamura, K., Kawashima, R., Sato, N., Nakamura, A., Sugiura, M., Kato, T., Hatano, K., Ito, K., Fukuda, H., Schormann, T., Zilles, K. (2000)
Functional delineation of the human occipito-temporal areas related to face and scene processing. A PET study
Brain, 123, 1903 – 1912

Nakamura, K., Kawashima, R., Sugiura, M., Kato, T., Nakamura, A., Hatano, K., Nagumo, S., Kubota, K., Fukuda, H., Ito, K., Kojima, S. (2001)
Neural substrates for recognition of familiar voices: a PET study
Neuropsychologia, 39, 1047 – 1054

Ochsner, K. N., Knierim, K., Ludlow, D. H., Hanlein, J., Ramachandran, T., Glover, G., Mackey, S. C. (2004)
Reflecting upon feelings: an fMRI study of neural systems supporting the attribution of emotion to self and other
J Cogn Neurosci, 16, 1746 – 1772

Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R., Tank, D. W. (1990 a)
Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation
Proc Natl Acad Sci USA, 87, 9868 – 9872

Ogawa, S., Lee, T. M., Nayak, A. S., Glynn, P. (1990 b)
Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields
Magn Reson Med, 14, 68 – 78

Pelphrey, K. A., Morris, J. P., McCarthy G. (2004 a)
Grasping the intenions of others: the perceived intentionality of an action influences activity in the superior temporal sulcus during social perception
J Cogn Neurosci, 16, 1706 – 1716

Pelphrey, K. A., Viola, R. J., McCarthy G. (2004 b)
When strangers pass: processing of mutual and averted social gaze in the superior temporal sulcus
Psychol Sci, 15, 598 – 603

Pelphrey, K. A., Morris, J. P., Michelich, C. R., Allison, T., McCarthy, G. (2005)
Functional anatomy of biological motion perception in posterior temporal cortex: an fMRI study of eye, mouth and hand movements
Cereb Cortex, 15, 1866 – 1876

Perner, J., Aichhorn, M., Kronbichler, M., Staffen, W., Ladurner, G. (2006)
Thinking of mental and other representations: the roles of left and right temporo-parietal junction
Soc Neurosci, 1, 245 – 258

Phelps, E. A., O'Connor, K. J., Cunningham, W. A., Funayama, E. S., Getanby, J. C., Gore, J. C., Banaji, M. (2000)
Performance on indirect measures of race evaluation predicts amygdala activation
J Cogn Neurosci, 12, 729 – 738

Phillips, M. L., Young, A. W., Scott, S. K., Calder, A. J., Andrew, C., Giampietro, V., Williams, S. C. R., Bullmore, E. T., Brammer, M., Gray, J. A. (1998)
Neural responses to facial and vocal expressions of fear and disgust
Proc Biol Sci, 265, 1809 – 1817

Premack, D., Woodruff, G. (1978)
Does the chimpanzee have a theory of mind?
Behav Brain Sci, 1, 515 – 526

Puce, A., Allison T., Bentin, S., Gore, J. C., McCarthy, G. (1998)
Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements
J Neurosci, 18, 2188 – 2199

Reiser, M., Semmler, W. (2002)
Magnetresonanztomografie
3. Auflage, Springer Verlag, Berlin

Ruby, P., Decety, J. (2001)
Effect of subjective perspective takingduring simulation of action: a PET investifation of agency
Nat Neurosci, 4, 546 – 550

Ruby, P., Decety, J. (2003)
What you believe versus what you think they believe: a neuroimaging study of conceptual perspective-taking
Eur J Neurosci, 17, 2475 – 2480

Ruby, P., Decety, J. (2004)
How would you feel versus how do you think she would feel? A neuroimaging study on perspective-taking with social emotions
J Cogn Neurosci, 16, 988 – 999

Sarfati, Y., Hardy-Baylé, M. C., Besche, C., Widlöcher, D. (1997)
Attribution of intentions to others in people with schizophrenia: a non-verbal exploration with comic strips
Schizophr Res, 25, 199 – 209

Saxe, R., Kanwisher, N. (2003)
People thinking about thinking people. The role of the temporo-parietal junction in “theory of mind”
Neuroimage, 19, 1835 – 1842

Saxe, R., Carey, S., Kanwisher, N. (2004)
Understanding other minds: linking developmental psychology and functional neuroimaging
Annu Rev Psychol, 55, 87 - 124

Saxe, R., Wexler, A. (2005)
Making sense of another mind: The role of the right temporo-parietal junction
Neuropsychologia, 43, 1391 – 1399

Saxe, R., Powell, L. J. (2006 a)
It’s the thought that counts: specific brain regions for one component of theory of mind
Psychol Sci, 17, 692 – 699

Saxe, R. (2006 b)
Uniquely human social cognition
Curr Opin Neurobiol, 16, 235 – 239

Schultz, R. T. Grelotti, D. J., Klin, A., Kleinmann, J., Van der Gaaf, C., Marois, R., Skudlarski, P. (2003)
The role of the fusiform face area in social cognition; implications for the pathobiology of autism
Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 358, 415 – 427

Schultz, R. T., Imamizu, H., Kawato, M., Frith, C. D. (2004)
Activation of the human superior temporal gyrus during observation of goal attribution to intentional objects
J Cogn Neurosci, 16, 1695 – 1705

Serences, J., Schwarzbach, J., Courtney, S., Golay, X., Yantis, S. (2004)
Control of object-based attention in human cortex
Cereb Cortex, 14, 1346 – 1357

Shamay-Tsoory, S. G., Aharon-Peretz, J. (2007)
Dissociable prefrontal networks for cognitive and affective theory of mind: A lesion study
Neuropsychologia, 45, 3054 – 3067

Shomstein, S., Yantis, S. (2004)
Control of attention shifts between vision and audition in human cortex
J Neurosci, 24, 10702 – 10706

Shulman, G. L., Astafiev, S. V., McAvoy, M. P., d'Avossa, G., Corbetta, M. (2007)
Right TPJ deactivation during visual search: functional significance and support for a filter hypothesis
Cereb Cortex, 17, 2625 – 2633

Sommer, M., Döhnel, K., Sodian, B., Meinhardt, J., Thoermer, C., Hajak, G. (2007)
Neural correlates of true and false belief reasoning
Neuroimage, 35, 1378 – 1384

Spiers, H. J., Maguire, E. A. (2006)
Spontaneous mentalizing during an interactive real world task: an fMRI study
Neuropsychologia, 44, 1674 – 1682

Steele, J. D., Lawrie, S M. (2004)
Segregation of cognitive and emotional function in the prefrontal cortex: a stereotactic meta-analysis
Neuroimage, 21, 868 – 875

Sullivan, K., Zaitchik, D., Tagerflusberg, H. (1994)
Preschoolers can attribute 2nd-order beliefs
Devl Psychol, 30, 395 – 402

Turner, R., Le Bihan, D., Moonen, C. T., Despres, D., Frank, J. (1991)
Echo-planar time course MRI of cat brain oxygenation changes
Magn Reson Med, 22, 159 – 166

Vandenberghe, R., Gittelman, D., Parrish, T., Mesulam, M. (2001)
Location- or feature-based targeting of peripheral attention
Neuroimage, 14, 37 – 47

Vogeley, K., Bussfeld, P., Newen, A., Herrmann, S., Happe, F., Falkai, P., Maier, W., Shah, N. J., Fink, G. R., Zilles, K. (2001)
Mind reading: neural mechanisms of theory of mind and self-perspective
Neuroimage, 14, 170 – 181

Vogeley, K., Fink, G R. (2003)
Neural correlates of the first-person-perspective
Trends Cogn Sci, 7, 38-42

Völlm, B. A., Taylor, A. N., Richardson, P., Corcoran, R., Stirling, J., McKie, S., Deakin, J. F., Elliot, R. (2006)
Neuronal correlates of theory of mind and empathy: A functional magnetic resonance imaging study in a nonverbal task
Neuroimage, 29, 90 – 98

Walter, H., Adenzato, M., Ciaramidaro, A., Enirici, I., Pia, L., Bara, B. G. (2004)
Understanding intentions in social interaction: the role of the anterior paracingulate cortex
J Cogn Neurosci, 16, 1854 – 1863

Wicker, B., Michel, F., Henaff, M. A., Decety, J. (1998)
Brain regions involved in the perception of gaze: a PET study
Neuroimage, 8, 221 – 227

Wimmer, H., Perner, J. (1983)
Beliefs about beliefs: representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception
Cognition, 13, 103 – 128

Winston, J. S., Strange, B. A., O'Doherty, J. Dolan, R. J. (2002)
Automatic and intentional brain responses during evaluation of trustworthiness of faces
Nat Neurosci, 5, 277 – 283

Yantis, S., Schwarzbach, J., Serences, J., Carlson, R., Steinmetz, M. (2002)
Transient neural activity in human parietal cortex during spatial attention shifts
Nat Neurosci, 5, 995 – 1002

Zaitchik, D. (1990)
When representations conflict with reality: the preschooler's problem with false beliefs and "false" photographs
Cognition, 35, 41 – 68

10 Anhang 1

zu **1.2.3 Mit Theory of Mind assoziierte Hirnareale**

Die nachfolgende Tabelle enthält 24 ToM-Studien sortiert nach den untersuchten mentalen Zuständen:

(1) undefinierte mentale Zustände
(2) Intention
(3) *False belief*
(4) Erwartung
(5) Emotion
(6) Überlegung
(7) Emotion und Wissen
(8) Emotion und Intention
(9) Emotion und Überlegung
(10) Intention und Überlegung
(11) *False belief* und Intention
(12) Wünsche

Die in den Studien verwendeten Stimuli, eine kurze Beschreibung der Aufgaben, die analysierten Kontraste sowie die dabei angewendeten statistischen Kriterien sind den jeweiligen Spalten zu entnehmen. Es sind nur die Aktivierungen in ToM assoziierten Hirnarealen (TPJ, MPFC, Precuneus, STS, Poli temporales) angegeben. Lagen die berichteten Aktivierungen innerhalb des in der vorliegenden Arbeit definierten Bereichs (in der jeweiligen Spalte angegeben) für die einzelnen Hirnareale, so sind die Koordinaten in der jeweiligen Spalte aufgeführt. Manche Studien untersuchten andere ROIs als die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Hirnareale. Solche Fälle sind gekennzeichnet mit „kein ROI“. Alle Koordinaten sind in MNI-Koordinaten angegeben. Falls in den genannten Studien Tailarach-Koordinaten angegeben waren, so wurden diese mit dem Programm *BrainMap GingerALE* (Dateiversion 1.1, The BrainMap Project, Research Imaging Center, San Antonio, Texas, USA) in MNI-Koordinaten umgewandelt und mit „aus TAL“ gekennzeichnet.

Anhang 1: ToM-Studien mit Aktivität in den mit der ToM assoziierten Hirnarealen. Alle Koordinaten sind in MNI-Koordinaten angegeben (∅ = keine Angaben, AFC = Auswahl aus vorgegebenen Antworten [answer forced choice], aus TAL = aus Tailarach-Koordinaten in Montreal Neurological Institute (MNI)-Koordinaten umgewandelt, fMRT = funktionelle Magnetresonanztomografie, IAPS = International Affective Picture System, k = Clustergröße, mm = Millimeter, MPFC = medialer präfrontaler Kortex, p = Wahrscheinlichkeit, p* = korrigierte Wahrscheinlichkeit, PET = Positronen-Emissionstomografie, ROI = „region of interest“, STS = Sulcus temporalis superior, ToM = Theory of Mind, TP = Polus temporalis, TPJ = temporo-parietale Junktion, vs. = versus)

	Stimuli	**Aufgabe**	**Kontrast**	**Statistische Kriterien**	**TPJ rechts**	**TPJ links**	**MPFC**	**Precu-neus**	**STS rechts**	**STS links**	**TP rechts**	**TP links**
					x: 34-73 y: -40--80 z: 6-44	**x: -34--73 y: -40--80 z: 6-44**	**x: 0-(-)18 y: 50-63 z: 0-40**	**x: 0-(-)18 y: -48--72 z: 4-65**	**x: 38-66 y: 8--58 z: 21--32**	**x: -38--66 y: 8--58 z: 21--32**	**x: 38-63 y: -15-21 z: -15--56**	**x: -38--63 y: -15-21 z: -15--56**
Undefinierte mentale Zustände												
Fletcher et al. (1995 b) PET	Geschichten (ToM/Nicht-ToM/ einzelne Sätze)	Antwort in Gedanken	ToM vs. einzelne Sätze	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse		-46 -58 24 (aus TAL)	-12 50 35 (aus TAL)			-44 -58 20 (aus TAL)	44 18 -16 (aus TAL)	-47 21 -24 (aus TAL)
			ToM vs. Nicht-ToM		47 -49 26 (aus TAL)							
Gallagher et al. (2000) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Antwort in Gedanken auf Fragen bezüglich Intentionen	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	73 -53 8 (aus TAL)	-48 -56 31 (aus TAL)	-8 56 1 (aus TAL)				59 10 -56 (aus TAL)	-51 12 -45 (aus TAL)
	Karikaturen (ToM/Nicht-ToM)	Anschauen und verstehen	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	64 -43 25 (aus TAL)			15 -48 65 (aus TAL)				

Ferstl & von Cramon (2002) fMRT	Sätze mit/ohne Zusammenhang und sinnlose Sätze (scrambled)	2 AFC darüber, ob die Probanden sich mit der genannten Person identifizieren können oder nicht	ToM (Sätze mit/ohne Zusammenhang) vs. Nicht-ToM (scrambled Sätze)	p = 0,001 k = 5 (Grenzwert der räumlichen Ausdehnung = 225 mm³) Ganzhirnanalyse		-52 -65 31 (aus TAL)		8 -56 14 -9 -58 25 (aus TAL)	51 -2 -23 (aus TAL)	-62 -60 11 -57 -13 -11 (aus TAL)		
Intention												
Brunet et al. (2000) PET	Comics (ToM/Nicht-ToM)	3 AFC zum Ende der Comics (Bilder)	ToM vs. Nicht-ToM (mit Personen)	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse			18 50 13 (aus TAL)			-40 8 -23 (aus TAL)		
German et al. (2004) fMRT	Videos von Personen, die eine Tätigkeit ausführen oder mimen	Entscheiden, ob die Tätigkeit zu Ende geführt ist oder nicht	gemimte Tätigkeit vs. ausgeführte Tätigkeit	p = 0,005 k = 30 Ganzhirnanalyse					65 -58 16 (aus TAL)			
Walter et al. (2004) fMRT	Comics (ToM/Nicht-ToM [Objekte])	3 AFC zum Ende der Comics (Bilder)	Experiment 1: Private Intention (1 Person) vs. Nicht-ToM	p = 0,001 p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse	54 -63 9	-48 -60 24		3 -60 36 -6 -57 48	57 -51 12		63 -3 -15	
			Experiment 1: Private Intention (2 Personen) vs. Nicht-ToM		57 -51 12			9 -54 4 -3 -57 54			57 -9 -15	
			Experiment 1: Kommunikative Intention vs. Nicht-ToM		54 -60 12		0 54 12	9 -54 24 -3 -57 54	51 -42 12	-36 -51 21	54 0 -21	-63 -15 -15
			Experiment 2: Private Intention vs. Nicht-ToM		54 -60 9			3 -54 42 -6 -45 60	51 -42 21			

			Experiment 2: Kommunikative Intention vs. Nicht-ToM				0 60 18	3 -54 51 -6 -51 30	54 -48 18	-57 -48 18		
			Experiment 2: Prospektive soziale Intention vs. Nicht-ToM		45 -51 9	-42 -57 18	3 54 12 -3 54 15	3 -60 30 -6 -51 39	57 -54 15			
Ciaramidaro et al. (2007) fMRT	Comics (ToM/Nicht-ToM)	3 AFC zum Ende der Comics (Bilder)	Private Intention vs. Nicht-ToM	p = 0,001 p* = 0,05 k = ∅ vordefinierte ROIs	51 -42 21			3 -54 42	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
			Prospektive soziale Intention vs. Nicht-ToM		57 -54 15	-54 -51 15	-3 54 15	-6 -51 39	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
			Kommunikative Intention vs. Nicht-ToM		54 -48 18	-57 -48 18	0 60 18	3 -54 51	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
(False) belief												
Vogeley et al. (2001) fMRT	Geschichten (ToM/ToM und Eigenperspekti-ve/Eigenperspekt ive/Nicht-ToM)	Antwort in Gedanken	ToM vs. Nicht-ToM (Sätze ohne Zu-sammenhang)	p* = 0,05 k = 17 Ganzhirnanalyse								
			(ToM+ToM und Eigenperspektive) vs. (Eigenperspekti-ve+Nicht-ToM)									-62 11 -16 (aus TAL)

Saxe & Kanwisher (2003) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Lesen in Gedanken	Experiment 1: ToM vs. Nicht-ToM (keine Menschen)	p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse	51 -54 2	-54 -60 21			66 -18 -15	-57 -27 -12		
		2 AFC zur Geschichte (Text)	Experiment 2: ToM vs. Nicht-ToM (false photograph[1])	p = 0,0001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	54 -51 18	-48 -63 33	6 57 18	3 -54 30 -9 -51 33	54 -18 -15			
Ruby & Decety (2003) PET	Fragen zu Gesundheitsthemen	Antwort basierend auf eigenem Wissen/Antwort basierend auf dem Wissen eines Laien	Wissen eines Laien vs. eigenes Wissen	p = 0,005 k = ∅ Ganzhirnanalyse	44 -70 36			-18 -68 16	50 -30 6			
Perner et al. (2006) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	2 AFC zum Schluss der Geschichte (Text) oder Frage zur Geschichte	ToM vs. Nicht-ToM (false photograph[1])	p = 0,001 p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse	54 -57 27	-48 -57 30	-15 54 36	9 -54 33	39 -30 12			
		Lesen in Gedanken	ToM vs. Nicht-ToM (Erkennen zeitlicher Veränderungen)		51 -66 27	-45 -57 27						
Sommer et al. (2007) fMRT	Comics (Sally-Ann-Szenarien)	2 AFC zum Ende der Comics (Bilder)	richtige Überzeugung vs. false belief	p* = 0,05 k = ∅ Ganzhirnanalyse			0 56 26					
			false belief vs. richtige Überzeugung		34 -54 24			4 -47 52				
			Konjunktion false belief und richtige Überzeugung					-6 -72 56				
Mitchell (2008) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	2 AFC zum Ende der Geschichte	ToM vs. Nicht-ToM	p = 0,001 k = 25 Ganzhirnanalyse	54 -51 27		6 60 30	3 -57 24				

Erwartung												
Grèzes et al. (2004 a) fMRT	Videos von Personen, die Kisten anheben; die Personen haben falsche/richtige Erwartungen über das Gewicht der Kisten	Angeben, ob die Person die falsche oder richtige Erwartung hatte	falsche vs. richtige Erwartung der Person	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	47 -64 30 [aus TAL]							
			als falsch angegebene vs. als richtig angegebene Erwartung der Person			-50 -46 17 [aus TAL]			66 -45 1 [aus TAL]	-57 -50 1 [aus TAL]		
Grèzes et al. (2004 b) fMRT	Videos von Personen, die Kisten anheben; in der Hälfte der Videos gibt die Person vor, die Kiste sei schwerer oder leichter als sie eigentlich ist	Angeben, ob die Person bezüglich des Gewichts der Kiste zu täuschen versucht (Täuschung) oder nicht (Real)	Wahrnehmen von Täuschung vs. Wahrnehmen von Real	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	71 -43 23 (aus TAL)				55 -33 -9 (aus TAL)			
			Beurteilen des Anhebens als Täuschung vs. als Real						58 -54 38 (aus TAL)	-44 -59 36 (aus TAL)		

Emotion												
Ochsner et al. (2004) fMRT	IAPS Bilder	Erkennen der Emotion (negativ/neutral/positiv) der Person im Bild/Beurteilen, ob die Szene im Freien, in einem Raum oder undefiniert ist	Emotionserkennung vs. Beurteilung im Freien/im Raum/undefiniert	p = 0,005 k = 20 Ganzhirnanalyse			6 54 26 -6 52 32	-10 -58 32	44 -42 6			
Lamm et al. (2007) fMRT	Videos von Patienten während einer schmerzvollen Therapie	Emotionserkennung des Patienten vs. Vorstellen der eigenen Emotion in der Situation des Patienten	Emotion Patient vs. eigene Emotion	p = 0,001 k = 5 Ganzhirnanalyse	48 -64 44							
Überlegung												
Saxe & Powell (2006) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	Lesen in Gedanken	ToM vs. Nicht-ToM (false photographs[1])	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	60 -57 15	-51 -57 27	-9 51 3		60 -18 -21			
	Geschichten (ToM/Aussehen/ körperliches Empfinden)	Knopfdruck, wenn man fertig ist mit Lesen	ToM vs. Nicht-Tom (Aussehen und körperliches Empfinden)	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse	57 -54 18	-60 -54 24		0 -51 39				

Emotion/Wissen												
Ruby & Decety (2004) PET	Aussagen, die emotionale Reaktionen provozieren (Emotionen)/Aussagen zu Gesundheitsthemen (Wissen)	Beurteilung der eigenen Reaktion/der Reaktion der eigenen Mutter (6-Punkteskala)/Beurteilung der Richtigkeit der Aussage basierend auf dem eigenen Wissen/dem Wissen der eigenen Mutter	Beurteilung aus Sicht der Mutter (Emotionen und Wissen) vs. eigene Beurteilung (Emotionen und Wissen)	p = 0,001 k = 10 Ganzhirnanalyse	62 -64 22 46 -56 22	-58 -58 28	4 50 40 -8 44 20			-58 -4 -32		
			Interaktion ([Beurteilung aus Sicht der Mutter (Emotionen) vs. eigene Beurteilung (Emotionen)] vs. [Beurteilung aus Sicht der Mutter (Wissen) vs. eigene Beurteilung (Wissen)])								-60 -2 -32	
Emotion/Intention												
Völlm et al. (2006) fMRT	Comics (ToM [Emotionen/Intentionen]/ Nicht-ToM [physikalische Kausalitäten])	2 AFC zum Ende der Comics (Bilder)	Emotionserkennung vs. Nicht-ToM (2 Personen)	p = 0,001 k = ∅ Ganzhirnanalyse		-53 -58 21 [aus TAL]					62 3 -29 [aus TAL]	

			Intentionserkennung vs. Nicht-ToM (1 Person)		50 -79 23 [aus TAL]	-62 -57 27 [aus TAL]			68 8 -12 [aus TAL]			
			Interaktion (Emotionserkennung vs. Intentionserkennung)				11 59 5 [aus TAL]					
			Interaktion (Intentionserkennung vs. Emotionserkennung)						68 4 -12 [aus TAL]			
			Konjunktion (ToM vs. Nicht-ToM)		59 -60 19 [aus TAL]	-56 -57 23 [aus TAL]						
Emotion/Überlegung												
Hynes et al. (2006) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	3 AFC zu Fragen über die Emotionen/Überlegung einer Person/Details der Geschichte	Emotionserkennung vs. Nicht-ToM	p = 0,005 k = 5 vordefinierte ROIs	59 -65 26 59 -51 21 [aus TAL]	-52 -66 21 [aus TAL]		kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
			Überlegungserkennung vs. Nicht-ToM		59 -65 26 59 -51 21 [aus TAL]	-52 -66 21 [aus TAL]		kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
			Emotionserkennung vs. Überlegungserkennung					kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI
			Überlegungserkennung vs. Emotionserkennung		∅	∅	∅	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI	kein ROI

Intention/Überlegung												
Spiers & Maguire (2006) fMRT	Virtuelle Nachbildung von London	Fahrgäste zum Ziel bringen/zielloses Herumfahren	Fahrgäste zum Ziel bringen vs. zielloses Herumfahren	p = 0,001 k = 5 vordefinierte ROIs			3 57 6	kein ROI	60 -36 0		39 18 -33	
(False) belief/Intention												
Gobbini et al. (2007) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM)	2 AFC zum Inhalt der Geschichten	ToM (false belief) vs. Nicht-ToM	p = 0,001 Aktivitätscluster = 100 µl Ganzhirnanalyse	63 -55 29 [aus TAL] (p = 0,01)	-56 -59 29 [aus TAL]	8 59 29 -2 59 4 [aus TAL]	-10 -48 36 [aus TAL]			38 13 -41 [aus TAL]	-53 11 -34 [aus TAL]
	Animierte geometrische Figuren	2 AFC zur Entscheidung für den geeigneten Titel der Animation	Intentionelle vs. willkürliche Bewegungen				10 58 13 [aus TAL]		52 -45 16 [aus TAL]	-49 -15 -12 [aus TAL]		
Wünsche												
Saxe & Wexler (2005) fMRT	Geschichten (ToM/Nicht-ToM) 3 Faktoren: kultureller Hintergrund, Norm, Resultat	2 AFC (negativ/positiv) zur Frage über die Reaktion einer Person am Ende der Geschichte	Interaktionen	funktionell definierte ROIs für individuelle Probanden, nicht verwertbar								

[1] *false photograph*: Angaben, die nicht mehr der präsentierten Realität entsprechen (Zaitchik 1990)

11 Anhang 2

zu **3.2 Hirnaktivität**

Anhang 2: Hirnaktivität in visuellen Hirnarealen (MNI = Montreal Neurological Institute, Phys 1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und zwei Personen, t = Signifikanzniveau, ToM = Theory of Mind)

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
ToM versus Nicht-ToM		
Occipitotemporaler Kortex links (874 Voxel)		
Gyrus fusiformis links	-30 -51 -15	6,3
Gyrus occipitalis inferior links (visuelles Kortexareal V4)	-27 -81 -12	5,9
Gyrus occipitalis inferior links (visuelles Kortexareal V4)	-33 -78 -12	5,6
Gyrus occipitalis medius links	-27 -93 0	5,5
Gyrus fusiformis links	-36 -72 -15	4,9
Occipitaler Kortex rechts (397 Voxel)		
Gyrus occipitalis medius rechts	33 -90 0	6,7
Gyrus occipitalis inferior rechts	39 -81 -9	4,7
Gyrus occipitalis inferior rechts	42 -78 -6	4,4
Fusiformer Kortex rechts (151 Voxel)		
Gyrus fusiformis rechts	33 -45 -15	4,9
Gyrus fusiformis rechts	30 -48 -12	4,8
Anteriorer Gyrus temporalis medius (24 Voxel)		
Gyrus temporalis medius rechts	54 -6 -18	4,4

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Intentionserkennung versus Phys 1 und Phys 2		
Occipitotemporaler Kortex links (883 Voxel)		
Gyrus fusiformis links	-30 -51 -15	5,8
Gyrus fusiformis links	-27 -48 -12	5,7
Gyrus occipitalis medius links	-30 -90 3	5,3
Gyrus occipitalis medius links	-36 -81 21	5,0
Gyrus occipitalis medius links	-39 -78 24	5,0
Gyrus occipitalis medius links	-3 -87 18	4,8
Gyrus occipitalis medius links	-39 -81 15	4,7
Gyrus occipitalis medius links	-45 -84 -3	4,7

Gyrus occipitalis inferior links (visuelles Kortexareal V4)	-30 -78 -9	4,5
Gyrus occipitalis medius links	-48 -75 12	4,4
Occipitotemporaler Kortex rechts (746 Voxel)		
Gyrus occipitalis medius rechts	33 -87 3	7,2
Gyrus occipitalis medius rechts	30 -87 9	7,1
Gyrus occipitalis medius rechts (Brodmann Areal 18)	21 -93 6	5,6
Gyrus occipitalis medius rechts	42 -78 -6	4,6
Gyrus occipitalis medius rechts	45 -75 -3	4,5
Gyrus temporalis medius rechts	45 -60 12	3,7
Lingualer/fusiformer Kortex rechts (81 Voxel)		
Gyrus lingualis rechts	27 -48 -9	4,5
Gyrus fusiformis rechts	30 -45 -15	4,5

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Emotionserkennung versus Phys 1 und Phys 2		
Occipitotemporaler Kortex links (229 Voxel)		
Gyrus fusiformis links	-39 -72 -15	4,9
Gyrus fusiformis links	-39 -57 -18	4,8
Gyrus lingualis links (visuelles Kortexareal V4)	-27 -81 -15	4,1
Gyrus occipitalis inferior links (visuelles Kortexareal V4)	-33 -78 -12	3,7
Gyrus temporalis superior rechts (99 Voxel)		
Gyrus temporalis superior rechts	48 -27 -3	4,7
Gyrus temporalis superior rechts	45 -33 3	4,5
Occipitaler Kortex links (30 Voxel)		
Gyrus occipitalis inferior links (visuelles Kortexareal V3)	-21 -90 -9	3,9
Gyrus occipitalis medius links (visuelles Kortexareal V3)	-18 -87 -3	3,7
Occipitaler Kortex rechts (29 Voxel)		
Gyrus occipitalis inferior rechts (visuelles Kortexareal V4)	36 -84 -12	3,9
Gyrus lingualis rechts (visuelles Kortexareal V3)	30 -87 -18	3,8

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Intentionserkennung versus Emotionserkennung		
Occipitaler Kortex rechts (303 Voxel)		
Gyrus occipitalis medius rechts	33 -87 12	5,2
Gyrus occipitalis medius rechts	36 -84 15	5,1
Gyrus occipitalis medius rechts	36 -78 24	4,8
Occipitaler Kortex links (103 Voxel)		
Gyrus occipitalis medius links	-36 -81 24	4,4

Gyrus occipitalis medius links	-42 -84 15	4,1
Gyrus temporalis medius rechts (24 Voxel)		
Gyrus temporalis medius rechts	45 -60 3	4,0

	MNI-Koordinaten	**t-Wert**
Emotionserkennung versus Intentionserkennung		
Keine Aktivität in visuellen Arealen für diesen Kontrast		

12 Anhang 3

zu **3.2 Hirnaktivität**

Anhang 3.1: Individuelle Aktivierungspeaks für Intentions- und Emotionserkennung und ihr räumlicher Abstand in der linken TPJ (mm = Millimeter, MNI = Montreal Neurological Institute, Phys1 und Phys 2 = physikalische Kausalitäten mit einer und zwei Personen, vs. = versus)

Proband	**MNI-Koordinaten**		**Abstand der Peaks [mm] (Abstand auf x-, y-, z-Achse)**
	Intentionserkennung vs. Phys 1 und Phys 2	Emotionserkennung vs. Phys 1 und Phys 2	
1		-54 -63 33	
2	-30 -63 39	-45 -72 24	23 (-15 -9 -15)
3		-36 -69 30	
4	-51 -57 27		
5	-45 -78 30	-36 -51 24	29 (9 27 -6)
6	-33 -78 18		
7	-42 -60 3	-48 -63 30	28 (-6 -3 27)
8		-45 -72 -27	
9	-42 -72 27	-42 -54 36	20 (0 18 9)
10	-42 -75 27	-48 -57 24	19 (-6 18 -3)
11		-42 -84 27	
12	-36 -84 6		
13	-33 -81 9	-48 -66 30	30 (-15 15 21)
14	-45 -78 27	-45 -66 24	12 (0 12 -3)
15	-54 -75 24		
16	-51 -72 39	-36 -51 33	26 (15 21 -6)
17	-51 -69 42		
18			
19	-39 -66 24	-45 -63 33	11 (-6 3 9)
20	-30 -69 21		
21	-39 -75 18	-48 -51 24	26 (-9 24 6)
22		-39 -60 36	
23	-42 -75 27	-45 -60 27	15 (-3 15 0)
24	-39 -69 15	-39 -57 15	12 (0 12 0)

Anhang 3.2: Räumliche Abstände zwischen den individuellen Aktivierungspeaks für Intentions- und Emotionserkennung und dem ersten und zweiten Block der Intentionserkennung in der linken TPJ (Block Intention = Block mit Comics der Kategorie Intentionserkennung, mm = Millimeter, ToM = Theory of Mind)

Proband	**Abstand der Peaks [mm] (Abstand auf x-, y-, z-Achse)**		
	zwischen den ToM-Bedingungen	zwischen dem 1. und 2. Block Intention	zwischen den ToM-Bedingungen und dem 1. und 2. Block Intention
1			
2	23 (-15 -9 -15)		
3			
4		24 (-18 15 6)	
5	29 (9 27 -6)	26 (-3 15 21)	3 (12 12 -27)
6		25 (-24 6 6)	
7	28 (-6 -3 27)		
8			
9	20 (0 18 9)	9 (-3 0 9)	11 (3 18 0)
10	19 (-6 18 -3)	9 (-3 0 9)	10 (-3 18 -12)
11			
12			
13	30 (-15 15 21)		
14	12 (0 12 -3)	18 (-15 3 9)	-5 (15 9 -12)
15		21 (-9 18 6)	
16	26 (15 21 -6)	21 (-6 18 9)	5 (21 3 -15)
17			
18			
19	11 (-6 3 9)	12 (-12 0 0)	-1 (6 3 9)
20		11 (-9 6 3)	
21	26 (-9 24 6)	27 (-3 24 12)	-1 (-6 0 -6)
22			
23	15 (-3 15 0)	13 (-12 3 3)	3 (9 12 -3)
24	12 (0 12 0)		

Anhang 3.3: Räumliche Abstände zwischen den individuellen Aktivierungspeaks für Intentions- und Emotionserkennung und dem ersten und zweiten Block der Emotionserkennung in der linken TPJ (Block Emotion = Block mit Comics der Kategorie Emotionserkennung, mm = Millimeter, ToM = Theory of Mind)

Proband	**Abstand der Peaks [mm] (Abstand auf x-, y-, z-Achse)**		
	zwischen den ToM-Bedingungen	zwischen dem 1. und 2. Block Emotion	zwischen den ToM-Bedingungen und dem 1. und 2. Block Emotion
1		23 (-9 18 12)	
2	23 (-15 -9 -15)		
3		20 (-18 0 9)	
4			
5	29 (9 27 -6)	25 (-6 12 21)	4 (15 15 -27)
6			
7	28 (-6 -3 27)		
8		20 (-12 6 15)	
9	20 (0 18 9)	36 (-24 27 0)	-16 (24 -9 9)
10	19 (-6 18 -3)	35 (-9 9 33)	-16 (3 9 -36)
11		22 (-12 28 0)	
12			
13	30 (-15 15 21)	22 (-3 6 21)	8 (-12 9 0)
14	12 (0 12 -3)	24 (-9 6 21)	-11 (9 6 -24)
15			
16	26 (15 21 -6)	22 (-9 18 9)	4 (24 3 -15)
17			
18			
19	11 (-6 3 9)	14 (-12 3 6)	-3 (6 0 3)
20			
21	26 (-9 24 6)		
22		9 (-6 3 6)	
23	15 (-3 15 0)	3 (0 0 3)	12 (-3 15 -3)
24	12 (0 12 0)	12 (-3 12 0)	0 (3 0 0)

13 Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. Alireza Gharabaghi für die Einführung in die Neurowissenschaften und das Themengebiet der sozialen Kognition. Ohne seine mitreißende Begeisterung für die Neurowissenschaften und seiner Ermunterung, in diesem Bereich zu promovieren, hätte ich diese Arbeit nie begonnen.

Herzlich danken möchte ich den Mitarbeitern der Sektion für experimentelle Kernspinresonanz des ZNS für die angenehme und inspirierende Zusammenarbeit. Mein Dank geht an Mathias Röger, der mir geduldig die Bedienung des Kernspintomografen beigebracht und eine ungeachtet des Wochentags und der Arbeitszeit zügige Durchführung der Messungen ermöglicht hat. Herrn Dipl. Physiker Bernd Kardatzki danke ich für die schnellen Lösungen und hilfreichen Ratschläge bei technischen Problemen. Herr Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Michael Erb hat seine langjährige Erfahrung in der Arbeit mit Kernspintomografen mit mir geteilt und mit seinen durchdachten Anleitungen und Lösungsvorschlägen die Durchführung des fMRT-Experiments ermöglicht. Er hatte stets ein offenes Ohr für alle theoretischen und praktischen Probleme, die er durch sein unerschütterliches Engagement und seine fundierte Fachkenntnis, oft weit über die normalen Arbeitszeiten hinaus, löste. Herzlicher Dank gilt auch meiner Mitdoktorandin Jessica Jesser für die angenehme und produktive Zusammenarbeit.

Mein ganz großer Dank geht an Frau Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Silke Anders. Mit großem Engagement begleitete sie mich mit durchdachten Anleitungen sowie unzählbaren Hinweisen die gesamte Promotion über und betreute mich geduldig und fachlich kompetent. Besonders bei der Auswertung der Daten hat sie mich nicht nur unterstützt, sondern auch die Ergebnisse der von ihr durchgeführten Zusatzuntersuchungen (in der vorliegenden Arbeit wurden davon die *parameter estimates* und die räumlichen Aktivitätsmaxima in der TPJ während der ToM-Bedingungen verwendet) bereitgestellt.

Zu ganz besonderem Dank bin ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Dipl.-Biol. Wolfgang Grodd verpflichtet. Er ermöglichte mir die Durchführung der

Messungen am Kernspintomografen und stellte mir alle notwendigen Mittel zur Verfügung. Stets brachte er mir großes Vertrauen entgegen und gab mir die Freiheit, selbstständig an der Sektion für Experimentelle Kernspinresonanz des ZNS zu arbeiten. Ich danke ihm für die zuverlässige und hervorragende wissenschaftliche Betreuung. Sein Verständnis für meine Studienverpflichtungen, seine umfassende Unterstützung sowie die Hinweise und Ratschläge waren und sind von großem Wert für mich.

Ohne meine Familie und Freunde wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen. Ich danke meinen Schulfreunden Philipp und Stefan, meinen Studienfreunden Beate und Cihan sowie meinem WG-Mitbewohner Dierk für ihre Unterstützung und langjährige Freundschaft.

Abschließend gilt mein größter und am tiefsten empfundener Dank meinen Eltern. Ihr Verständnis für mein Studium und die Promotion und vor allem ihre unbedingte Liebe sowie Hilfe haben mir die nötige Kraft und das erforderliche Durchhaltevermögen zur Durchführung dieser Promotion gegeben.

14 Curriculum Vitae

Personalien

Name und Vornamen:	Atique, Naushad Bijoy
Geburtsdatum:	12.08.1983
Geburtsort:	Frankfurt am Main
Nationalität:	deutsch
Familienstand:	ledig
Eltern:	Gulshan Ara Atique
	Mohammed Atique Ullah

Schulischer Werdegang

1989 – 1993	Heinrich-Seliger-Grundschule, Frankfurt am Main
1993 – 1998	Elisabethen-Gymnasium, Frankfurt am Main
1998 – 2002	Otto-Hahn-Gymnasium, Ostfildern
07/ 2002	Zeugnis der allgemeinen Hochschulreife

Zivildienst

09/ 2002 – 07/ 2003	Städtische Kliniken Esslingen, Springer im OP

Universitärer Werdegang

Seit 10/ 2003	Studium der Humanmedizin an der Eberhard Karls Universität Tübingen
13. 09. 2005	Ärztliche Vorprüfung
18. 06. 2010	Ärztliche Prüfung

Pflegepraktikum

09/ 2002 – 12/ 2002	Städtische Kliniken Esslingen, Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie

Famulaturen

03/ 2006 – 04/ 2006	Robert-Bosch-Krankenhaus Stuttgart, Abteilung für Gastroenterologie
02/ 2007 – 03/ 2007	BG Unfallklinik Tübingen, Unfallchirurgische Ambulanz
03/ 2007	Neurochirurgische Klinik der Universität Tübingen, Poliklinik
08/ 2007 – 09/ 2007	Charite Campus Virchow, Klinik für Pädiatrie m. S. Onkologie/Hämatologie der Humboldt-Universität zu Berlin
02/2008 – 03/ 2008	*Paediatric Department of BMA Medical College and Vajira Hospital*, Bangkok, Thailand

Praktisches Jahr

02/ 2009 – 05/ 2009	Kantonsspital Uri, Abteilung Innere Medizin, Altdorf, Schweiz
06/ 2009 – 10/ 2009	Neurologische Klinik der Universität Tübingen
10/ 2009 – 11/ 2009	BG Unfallklinik Tübingen
11/ 2009 – 01/ 2010	Universitätsklinik für Allgemeine, Viszeral- und Transplantationschirurgie Tübingen