

Asymmetrische Modalitätseffekte auf die Genauigkeit bei inter- und bimodaler Zeitwahrnehmung

Dissertation

der Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Dipl.-Psych. Judith Nitschke
aus Stuttgart

Tübingen
2007

Tag der mündlichen Qualifikation:

05. Dezember 2007

Dekan:

Prof. Dr. Michael Diehl

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Rolf Ulrich

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. Thomas Rammsayer
(Universität Bern)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Wirkung der auditiven und der visuellen Modalität auf die Zeitwahrnehmung. Zeitempfindung im Millisekundenbereich ist fundamental wichtig für unsere Alltagsbewältigung. Ohne eine genaue zeitliche Koordination könnten wir uns nicht sprachlich verständigen, nicht am Computer arbeiten und keinen Ball treffen. Dabei scheint es keinen inneren Mechanismus zu geben, der die Zeit in festen Einheiten misst. So wird jede Zeitwahrnehmung von zahlreichen begleitenden Einflüssen moduliert, die bewirken, dass eine objektive Zeitdauer länger bzw. kürzer erscheint oder genauer bzw. ungenauer wahrgenommen wird. Damit werden bei Zeitvergleichen mindestens zwei subjektive Dauern verglichen. Dies ist ein Grund dafür, dass viele uneinheitliche Befunde zur Zeitwahrnehmung vorliegen. In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob sich die Vorgänge, die bei der Zeitdiskrimination von inter- und bimodalen Intervallen stattfinden, abbilden lassen. Dabei soll auch der wechselseitige Einfluss der auditiven und visuellen Modalitäten auf die Zeitwahrnehmung berücksichtigt werden.

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei allen, die direkt oder indirekt die Entstehung dieser Arbeit ermöglicht und unterstützt haben, mit geleisteten Versuchspersonenstunden ebenso wie mit Anregungen in Gesprächen. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Professor Dr. Rolf Ulrich, dessen Anregungen und Kritik diese Arbeit wesentlich beeinflusst haben. Ihm verdanke ich auch die Begeisterung für die Wahrnehmung und für die Anregung, Wahrnehmungsphänomene mit Hilfe von Modellen zu beschreiben.

Bei Dr. Bettina Rolke und Susana Ruiz Fernández bedanke ich mich ganz herzlich für das Durchlesen des Manuskriptes. Ihre Hinweise und Fragen trugen ganz wesentlich dazu bei, dass diese Arbeit klarer und verständlicher wurde.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich ganz besonders für die moralische Unterstützung, die mir im Laufe der Arbeit immer wieder gut getan hat, und für ihr Verständnis, wenn ich so oft länger als erwartet an dieser Arbeit saß.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
1.1 Allgemeine Fragestellung	7
1.2 Sensorisch - kognitive Kodierungshypothese	14
1.3 Generalisiertes Zählermodell	22
1.4 Zusammenfassung und Zielsetzung	34
2. Experiment 1: Kongruente vs. inkongruente Durchgänge	36
2.1 Methode	37
2.2 Ergebnisse	46
2.3 Diskussion	51
3. Experiment 2: Geblockte kongruente vs. inkongruente Durchgänge	55
3.1 Methode	57
3.2 Ergebnisse	58
3.3 Diskussion	61
4. Experiment 3: Abfolge Vergleichs- vor Standardintervall	63
4.1 Methode	69
4.2 Ergebnisse	69
4.3 Diskussion	72
5. Experiment 4: Bimodales Standard- und unimodales Vergleichsintervall	76
5.1 Methode	91
5.2 Ergebnisse	92

5.3 Diskussion	96
6. Experiment 5: Standard- und Vergleichsintervall bimodal	101
6.1 Methode	103
6.2 Ergebnisse	104
6.3 Diskussion	107
7. Experiment 6: Unimodales Standard- und bimodales Vergleichsintervall	110
7.1 Methode	115
7.2 Ergebnisse	116
7.3 Diskussion	119
8. Allgemeine Diskussion	122
8.1 Diskussion der Experimente	125
8.2 Diskussion einzelner Aspekte der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese	133
8.3 Diskussion einzelner Aspekte des generalisierten Zählermodells	136
8.4 Ausblick	143
Zusammenfassung	146
Literaturverzeichnis	148

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Fragestellung

Die Frage, wie Zeit verarbeitet wird, ist immer noch kontrovers diskutiert. Untersuchungen zur Zeitwahrnehmung sind u. a. dadurch erschwert, weil es kein eigenes Sinnesorgan zur Zeitwahrnehmung gibt. Während die Farbe eines visuellen Reizes oder die Frequenz eines Tones über die entsprechenden Sinne vergleichsweise direkt wahrgenommen werden, ist dies bei der Zeitwahrnehmung nicht möglich. Damit Zeitdauern wahrgenommen werden können, müssen interne Repräsentationen gebildet werden, die die Zeitdauer abbilden. Weil sich eine Zeitdauer nur an einem Ereignis messen lässt, das die Zeitdauer repräsentiert, werden stets gleichzeitig zusätzliche nichtzeitliche Informationen mit wahrgenommen. Solche Informationen können Prozesse wie Bewegungen oder kognitive Aufgaben sowie einfache Signale sein, deren Dauer bestimmt wird. Damit beurteilen Menschen, wie viel Zeit eine Bewegung eines Objektes, oder ein Gespräch, eine Aufgabe oder ein Musikstück benötigt. In all diese Urteile fließen zusätzliche Informationen mit ein, die nicht genuin zeitbezogen sind. Selbst in einem vergleichsweise einfachen Fall, wenn die Dauer eines auditiven oder visuellen Signals beurteilt werden soll, gehen zusätzliche Informationen mit ein, die in charakteristischer Weise mit der Modalität verbunden sind. So berichteten zum Beispiel bereits Goldstone und Goldfarb (1964), dass visuelle Reize in aller Regel kürzer wahrgenommen werden als auditive gleicher Länge. Goldstone und Lhamon (1974) stellten fest, dass auditive Reize genauer wahrgenommen werden als visuelle. Diese Befunde wurden vielfach repliziert und gelten als gesichert (z. B. Grondin, 2001). So ergaben

sich bereits seit langem Hinweise dafür, dass sensorische Information die subjektiven Repräsentationen von Zeitdauern mit beeinflusst.

Zwar sind die Charakteristika der auditiven und visuellen Modalität im Millisekundenbereich lange bekannt, d. h. visuelle Reize werden kürzer und ungenauer wahrgenommen als auditive. Da die meisten Arbeiten die Untersuchungen nach Modalitäten getrennt durchführten, existieren relativ wenige Untersuchungen, die die Einflüsse der beiden Modalitäten auf die Zeitwahrnehmung direkt miteinander vergleichen. Noch seltener sind Studien, die Zeitdiskriminationsaufgaben mit bimodalen Reizen, bei denen die auditive und visuelle Modalität simultan dargeboten wird, untersuchen. Obgleich viele Modelle zur Zeitwahrnehmung im Millisekundenbereich überprüft und diskutiert werden, gibt es bisher kein geeignetes Modell, um Vorhersagen zu Fällen abzuleiten, wenn Information der auditiven und der visuellen Modalität zugleich in die Zeitdauer mit eingehen. Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, diese Lücke zu schließen, indem aus zwei Modellen, die die sensorischen Einflüsse auf die Zeitwahrnehmung berücksichtigen, Hypothesen abgeleitet werden. Damit sollen die Einflüsse der auditiven und der visuellen Modalität auf die Zeitwahrnehmung systematisch untersucht werden. Da die Modalitäten sowohl die wahrgenommene Länge als auch die Genauigkeit des Urteils beeinflussen, sollen diese beiden Größen unabhängig voneinander erfasst werden. Der Kernpunkt dieser Untersuchungen wird dabei auf der wahrgenommenen Genauigkeit liegen.

Als Methode für gezielte Untersuchungen der Zeitwahrnehmung im Millisekundenbereich mit zwei Modalitäten bietet sich dabei die der Zeitdiskrimination an, die schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist. Dabei werden nach einer Vorperiode zwei Intervalle mit einem festen Interstimu-

lusintervall nacheinander dargeboten, ein zeitlich konstantes Standardintervall t_s , auf das ein Vergleichsintervall variabler Dauer t_c folgt. Die Versuchspersonen müssen die beiden Intervalle miteinander vergleichen und beurteilen, welches länger war. Dieses Verfahren hat gegenüber anderen Methoden zur Erfassung von Zeiturteilen den Vorteil, dass auditive und visuelle Reize zu unterschiedlichen intermodalen Durchgängen, d. h. in dieser Arbeit Durchgängen mit allgemein zwei Modalitäten, kombiniert werden können. Die Modalitäten der Durchgänge lassen sich gezielt zu kongruenten oder inkongruenten Durchgängen kombinieren. Bei kongruenten Durchgängen weisen Standard- und Vergleichsintervall die gleiche Modalität auf, d. h. auditiv - auditiv bzw. visuell - visuell, und bei inkongruenten Durchgängen sind Standard- und Vergleichsintervall unterschiedlicher Modalität, also auditiv - visuell sowie visuell - auditiv.

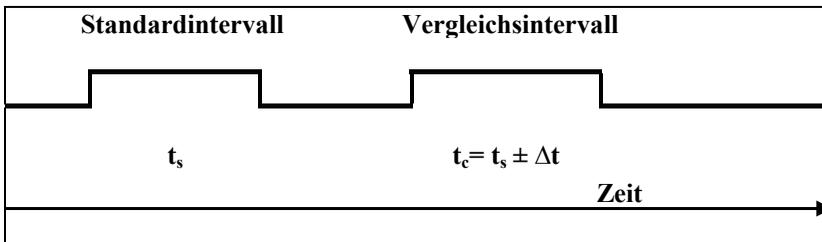


Abbildung 1: Ablauf eines Durchgangs nach der Methode der Zeitdiskrimination. Hier folgt das variable Vergleichsintervall t_c dem Standardintervall t_s . Bei kongruenten Durchgängen sind die beiden Intervalle gleicher Modalität, also auditiv - auditiv und visuell - visuell. Inkongruente Durchgänge bestehen aus zwei unterschiedlichen Modalitäten, auditiv - visuell oder visuell - auditiv.

Da gezielt der Einfluss der Modalitäten auf die Repräsentation von Zeitdauern untersucht werden sollte, wurden ausschließlich gefüllte Inter-

valle verwendet. Gefüllte Intervalle zeichnen sich dadurch aus, dass während ihrer gesamten Dauer ein konstantes visuelles bzw. auditives Signal dargeboten wird. Im Gegensatz dazu wird die Zeitdauer bei leeren Intervallen durch einen Anfangs- und einen Endimpuls, die auch Marker genannt werden, gekennzeichnet. Alle anderen zeitlichen Größen eines Durchgangs, das Interstimulusintervall und die Vorperiode, wurden in dieser Arbeit zeitlich konstant gelassen.

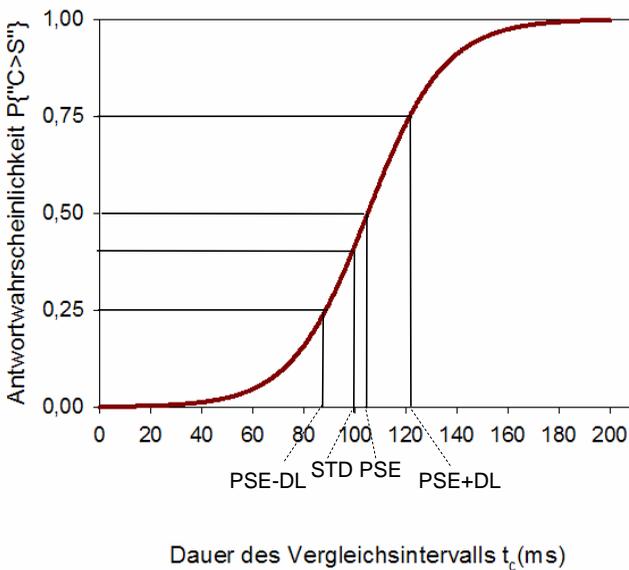


Abbildung 2: Psychometrische Funktion der Länge des Vergleichsintervalls. Sie gibt in Abhängigkeit von der Länge des Vergleichsintervalls t_c die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Länge des Vergleichsintervalls t_c länger als die des Standardintervalls mit der Dauer STD eingeschätzt wird. PSE beschreibt die Länge von t_c , an der mit einer Wahrscheinlichkeit von .5 das Vergleichsintervall länger als das Standardintervall beurteilt wird, entsprechend stehen (PSE+DL) für die Antwortwahrscheinlichkeit von .75 sowie (PSE-DL) für die Antwortwahrscheinlichkeit von .25.

Die Auswertung dieser Methode lässt sich an der psychometrischen Funktion in Abbildung 2 veranschaulichen. Dort ist dargestellt, wie lang ein Vergleichsintervall sein muss, damit eine Versuchsperson es mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit als länger als das Standardintervall beurteilt. Dabei wurde mittels einer Maximum - Likelihood - Schätzung der Punkt subjektiver Gleichheit (point of subjective equality; PSE) bestimmt mit $P\{C > S \mid t_s, t_c\} = 0.5$. Wenn das Vergleichsintervall die Dauer PSE hat, wird es in der Hälfte aller Fälle als länger wahrgenommen und damit im Mittel als gleich lang wie das Standardintervall beurteilt. Die Unterschiedsschwelle (difference limen; DL) stellt als ein Maß für die Abweichung der Urteile voneinander die wahrgenommene Genauigkeit dar. Sie wird als Mittelwert von zwei Intervallausprägungen, bei denen die Versuchsperson mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein Urteil abgibt, gebildet. Üblicherweise ist das der halbierte Interquartilabstand der zugehörigen psychometrischen Funktion. In dieser Arbeit wurde die Unterschiedsschwelle ebenfalls aus der Maximum - Likelihood - Schätzung bestimmt mit $DL = \frac{1}{2} \cdot (x_{.75} - x_{.25})$. Dabei beschreiben $x_{.75}$ bzw. $x_{.25}$ die Dauern von t_c , bei denen mit einer Wahrscheinlichkeit von .75 beziehungsweise .25 das Vergleichsintervall länger als das Standardintervall beurteilt wird. Anschaulich wird die Unterschiedsschwelle durch die Steilheit der psychometrischen Funktion dargestellt. Je steiler eine Kurve verläuft, desto weniger weichen die Urteile voneinander ab und desto genauer wird die Zeitdauer wahrgenommen. Damit drücken kleine Werte von DL eine höhere Genauigkeit bezüglich der Zeitwahrnehmung aus. Als Maß für die wahrgenommene Länge wird der konstante Fehler (constant error; CE) verwendet. Er ist als Differenz von subjektiver und objektiver Gleichheit der Zeitdauern defi-

niert, also $CE = PSE - \text{Standarddauer STD}$. Ein negativer Wert für CE impliziert, dass der PSE unter dem Wert der Standarddauer liegt. Das bedeutet für $CE < 0$, dass ein Vergleichsintervall, das gleich lang wie das Standardintervall ist, als länger wahrgenommen wird. Damit ist ein Vergleichsintervall, das gleich lang wie das Standardintervall wahrgenommen wird, kürzer. Ein positiver CE bedeutet, dass das Vergleichsintervall subjektiv kürzer erscheint, das Vergleichsintervall müsste verlängert werden, um als gleich lang zu erscheinen. Anders formuliert, steht ein positiver CE dafür, dass das Standardintervall subjektiv länger erscheint. Beträgt der Wert von $CE = 0$, so werden Standardintervall und Vergleichsintervall als gleich lang wahrgenommen.

Seit vielen Jahren werden Modelle aufgestellt, die abbilden, wie die interne Repräsentation von Zeitdauern aussehen könnte. Eine Repräsentation kann dadurch entstehen, dass die Versuchspersonen eine interne Kriteriumszeitdauer etablieren (Kristofferson, 1977; Thomas & Cantor, 1978). Meistens wird angenommen, dass die Repräsentation aus der Anzahl aufsummierter Zeitpunkte besteht, die über interne Prozesse erzeugt wurden (Carbotte & Kristofferson, 1973). Ein viel beachtetes Modell stellt das des internen Zählmechanismus dar, das parallel von Treisman (1963) und Creelman (1962) entwickelt wurde. Sie unterscheiden sich vor allem darin, dass Treisman (1963) ein neuronales Zählermodell mit einem arousal-gesteuerten Taktgeber annimmt, wobei die Pulsabstände konstant sind. Creelman (1962) legt dagegen einen Mechanismus zugrunde, der neuronale Pulse nach einem Poisson-Prozess erzeugt und registriert. Allen Modellen ist gemeinsam, dass die Anzahl der während einer bestimmten physikalischen Zeit aufsummierten Impulse die subjektive Zeit repräsentiert. Diese

Reizpräsentation dient als Basis für die Zeitwahrnehmung (z. B. Rammsayer & Brandler, 2004). Die Unterschiede in der Wahrnehmung von gleich langen visuellen und auditiven Reizen werden bei neuronalen Zählermodellen damit erklärt, dass auditive Reize durch eine höhere Pulsrate repräsentiert werden als visuelle (z. B. Grondin, 2001; Wearden, J., Edwards, H., Fakhri, M., & Percival, A., 1998). Dennoch existieren insgesamt recht wenig Arbeiten zur intermodalen Zeitwahrnehmung. Ein Grund dafür liegt möglicherweise darin, dass wenige Modelle den Einfluss verschiedener Modalitäten auf die Zeitwahrnehmung so beschreiben können, dass sich daraus Hypothesen ableiten lassen. In dieser Arbeit soll ein Versuch dazu unternommen werden, zwei Modelle zur Zeitverarbeitung von auditiven und visuellen Reizen einander gegenüberzustellen. Sie unterscheiden sich darin voneinander, wie die sensorische Information der auditiven bzw. der visuellen Modalität die inneren Repräsentationen bei der Zeitdiskrimination beeinflussen. Die beiden Modelle, die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese und das neuronale Zählermodell, werden mit den daraus abgeleiteten Hypothesen in den nächsten Abschnitten ausführlich beschrieben.

In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, welche der beiden Hypothesen die innere Repräsentation von Zeitdauern im Millisekundenbereich besser abbildet. Zu diesem Zweck wurde eine Serie intermodaler Experimente durchgeführt, drei mit unimodalen Intervallen, bei denen jedes in einer Modalität dargeboten wurde, und drei mit bimodalen Intervallen, die simultan auditiv und visuell dargeboten wurden.

Das erste Experiment soll grundsätzlich überprüfen, ob sich die Vorgänge, die bei der Zeitdauerdiskrimination stattfinden, eher durch die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese oder durch das generalisierte Zäh-

lermodell beschreiben lassen. Dazu werden im Folgenden die Hypothesen erläutert und ihre Vorhersagen abgeleitet.

1.2 Sensorisch - kognitive Kodierungshypothese

Der Ansatz zur Zeitverarbeitung, dem zufolge lange und kurze Zeitdauern über getrennte Mechanismen verarbeitet werden, findet neuerdings wieder vermehrt Beachtung (z. B. Grondin, S., Roussel, E., Gamache, P., Roy, M., & Ouellet, B., 2005; Hellström & Rammsayer, 2004; Rammsayer & Lima, 1991) und erhielt auch durch neurowissenschaftliche Ergebnisse (Buhusi & Meck, 2005; Lewis & Miall, 2003) wieder Aufwind und zunehmend größeres Interesse. Diese Hypothese geht auf Münsterberg (1889) zurück. Er nahm an, dass Zeitdauern unterhalb einer Dauer von 300 ms über sensorische Prozesse vermittelt werden und längere über andere Mechanismen, die auf muskulären Empfindungen basieren. In einem ähnlichen Ansatz postulierte James (1890), dass längere Zeitdauern anders verarbeitet werden als kurze. Dabei nahm er an, dass kürzere Zeitdauern unmittelbar wahrgenommen werden, längere hingegen symbolisch rekonstruiert, d. h. über kognitive Mechanismen wie Zählen oder symbolische Zeitmaßstäbe verarbeitet werden. Michon (1985) griff diesen Gedanken, dass kurze und lange Zeitdauern nicht gleichartig verarbeitet werden, wieder auf. Ihm zufolge werden Zeitdauern unterhalb von 500 ms über sensorische Mechanismen vermittelt, die eine direkte Verarbeitung ermöglichen und sich nicht durch kognitive Faktoren wie Aufmerksamkeit modulieren lassen. Lange Zeitdauern dagegen werden über kognitive Prozesse verarbeitet. Beide Mechanismen unterscheiden sich Michon (1985) zufolge sowohl in ihrer

Struktur als auch in ihrer Verarbeitungsweise. Die Angaben zu einer kritischen Zeitdauer oder einer Grenze, die den Übergang von einem Verarbeitungsmechanismus zum anderen beschreibt, variieren bei den Autoren; die Grenze wird meist im Bereich von 100 bis 500 ms angenommen (Rammsayer, Henning, Haag & Lange, 2001). In Anlehnung an die Grenzziehung zwischen den Zeitverarbeitungsmodi nach Michon (1985) und an Literaturbefunde (z. B. Rammsayer, 1992; 1999; Rammsayer et al., 2001) wird in dieser Arbeit zugrunde gelegt, dass die Grenze zwischen langen und kurzen Zeitdauern bei 300 bis 500 ms liegt. In Anlehnung an andere Arbeiten (Rammsayer & Ulrich, 2005) werden in dieser Arbeit für kurze Zeitdauern 100 ms und für lange 1000 ms verwendet.

Die modalitätenabhängige Repräsentation der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese lässt sich mit dem Modell der sensorischen Speicherorganisation von Cowan (1984) darstellen, demzufolge zwei sensorische Speicher und zusätzlich zwei Phasen eines sensorischen Speichers (Cowan, 1988) existieren. Sensorische Speicher zeichnen sich dadurch aus, dass sie modalitätsspezifisch organisiert sind. Deshalb kann ihre Information nicht einfach von einer in eine andere Modalität übertragen werden. In der ersten Phase des Speichers, dem kurzen sensorischen Speicher, der einige hundert Millisekunden umfasst, werden die ankommenden Signale unanalysiert aufgenommen. Die Information wird nicht abstrahiert und es können sehr feine Unterschiede bei Intervallen derselben Modalität wahrgenommen werden (Cowan, 1988; 1997). In der zweiten Phase, dem langen sensorischen Speicher, der einen Bereich von ca. 10 – 20 Sekunden umfasst, kann die Information auf einer abstrakteren Form weiterverarbeitet werden. Dies geschieht durch die Verbindungen, die ein langer sensorischer Spei-

cher zu anderen Systembestandteilen hat. Cowan (1997) bezeichnet ihn auch als "aktivierten Bestandteil des Langzeitgedächtnisses" oder "modalitätsspezifisches Kurzzeitgedächtnis". Sensorische Speicher existieren dem Modell zufolge in der auditiven, visuellen und taktilen Modalität und sind jeweils in der gleichen Weise organisiert (Cowan, 1984; 1988; 1997). Dabei existieren natürlich auch Unterschiede zwischen den verschiedenen sensorischen Speichern, so ist z. B. bei bestimmten Paradigmen die auditive Modalität der visuellen überlegen (ausführlich bei Cowan, 1984).

Die Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese lassen sich gut mit diesem Modell von Cowan (1997) veranschaulichen. Sie sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Nach Cowans Modell kann man sich vorstellen, dass kurze Reizdauern zunächst unanalysiert in einem modalitätsspezifischen Speicher aufgenommen und kodiert werden. Diese Kodierung soll im Folgenden *perzeptnah* genannt werden. In diesem Speicher sollte es relativ einfach sein, aufgrund der gleichen Codes zwei kurze Intervalle in derselben Modalität zu vergleichen. Treten jedoch zwei kurze Intervalle in verschiedenen Modalitäten auf, so können sie nach Cowan (1988; 1997) in den kurzen sensorischen Speichern nicht in eine andere Modalität übertragen und nicht direkt miteinander verglichen werden. Daraus ergibt sich, dass kurze Intervalle nur dann unmittelbar miteinander verglichen werden, wenn sie in demselben sensorischen Kode repräsentiert sind. Wenn die Intervalle unterschiedliche Sinnesmodalitäten stimulieren, so sind zu deren Verarbeitung weitere Prozesse erforderlich, die nach dem Modell von Cowan in den darauf folgenden langen sensorischen Speichern stattfinden. Diese unterhalten Verbindungen zu dem Langzeitgedächtnis, die über Aufmerksamkeitsprozesse und die zentrale Exekutive gesteuert

werden (Cowan, 1997). Damit sollten kurze Intervalle in der gleichen Modalität genauer diskriminiert werden können als kurze Intervalle in unterschiedlicher Modalität.

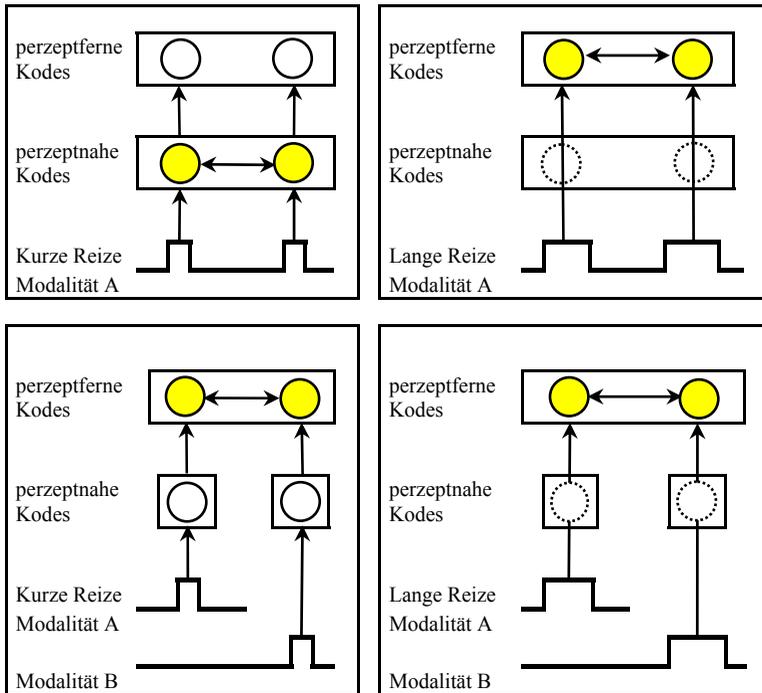


Abbildung 3: Kurze Zeitdauern liegen zunächst in perzeptnahen Kodes vor. Da gemäß dem Modell von Cowan (1997) von dort aus noch keine Verbindungen zu weiteren Systembestandteilen bestehen, lassen sich kurze Reize gleicher Modalität direkt miteinander vergleichen (links oben), nicht hingegen Reize unterschiedlicher Modalität (links unten). Lange Reize werden unabhängig davon, ob sie in derselben Modalität vorliegen oder nicht, immer in perzeptfernen Kodes repräsentiert. Damit werden sie unter Zuhilfenahme weiterer kognitiver Prozesse miteinander verglichen (rechts oben und unten).

Da die Intervalle in modalitätsspezifischen Codes repräsentiert werden, erfolgt der Vergleich, indem eine Differenz der beiden Repräsentationen gebildet wird (Carbotte & Kristofferson, 1971; Creelman, 1962). Lange Zeitdauern hingegen übersteigen das Fassungsvermögen der kurzen sensorischen Speicher und gelangen in die langen sensorischen Speicher. Von dort aus sollte, unabhängig davon, ob die Intervalle in gleicher oder unterschiedlicher Modalität auftreten, auf abstraktere Verarbeitungsprozesse zugegriffen werden. Diese lassen sich über die Verbindungen der langen sensorischen Speicher zu anderen Systembestandteilen realisieren. Langen Zeitdauern stehen somit in der zweiten Phase des Speichers kognitive Prozesse zur Verfügung, die mit der Zeitschätzung interferieren. Die abstrakteren Codes, in denen längere Zeitdauern repräsentiert werden, werden im Folgenden *perzeptferne Codes* genannt, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Bei langen wie bei kurzen Intervallen sollte der Vergleich zweier Zeitdauern erfolgen, indem zwei Zeiteinheiten bzw. Pulsanzahlen miteinander verglichen werden, d. h. eine Differenz zweier Größen gebildet wird.

Die psychophysische Befundlage von Verhaltensexperimenten bezüglich der sensorischen und kognitiven Einflüsse auf die Zeitwahrnehmung ist trotz vieler Literaturbefunde recht uneindeutig und schwer zu bewerten. Die Einflüsse werden oft nur für einen Zeitbereich im Sinne der Arbeit, also nur für lange oder kurze Reize, beschrieben. Bei Untersuchungen zu kognitiven Einflüssen auf die Zeitwahrnehmung überwiegen Untersuchungen mit langen Zeitdauern, was oft durch die Aufgabenstellung bedingt ist. Dadurch lässt sich oft nur vermuten, dass der Verarbeitung von Zeitinformation im Millisekundenbereich und im Sekundenbereich unterschiedliche Mechanismen zugrunde liegen.

Bezüglich langer Zeitdauern liegt mittlerweile starke Evidenz dafür vor, dass die Zeitverarbeitung mit kognitiven Nebenaufgaben interferiert (z. B. Brown & Boltz, 2002; Fortin & Breton, 1995). Inzwischen konnte die Wirkungsweise der kognitiven Prozesse, die sich auf die Zeitwahrnehmung auswirken, weiter spezifiziert werden. So konnte gezeigt werden, dass reines Memorieren zwar keinen Einfluss auf die Zeitwahrnehmung hat, aber die aktive Verarbeitung in Form von Rechenaufgaben oder mentaler Rotation die Zeitwahrnehmung beeinträchtigt (Fortin & Breton, 1995; Fortin, Rousseau, Bourque & Kirouac, 1993). Dass wirklich kognitive Prozesse relevant sind und keine Aufmerksamkeitsprozesse, die von der Zeitverarbeitung ablenken, geht aus anderen Untersuchungen hervor. Dabei konnte gezeigt werden (Brown, 1997; Dutke, 2005), dass bestimmte kognitive Aufgabenstellungen sich positiv im Sinne von günstig, andere dagegen negativ auf die Zeitverarbeitung auswirken. Diese Befunde sprechen dafür, dass zumindest ab einer bestimmten Zeitdauer die Zeitverarbeitung mit kognitiven Prozessen interferiert. Damit scheinen zumindest lange Zeitdauern im Arbeitsgedächtnis kognitiv repräsentiert zu sein.

Bezüglich der sensorischen Repräsentation der Zeitwahrnehmung ist die Befundlage auf psychophysischer Ebene uneinheitlicher. Die meisten Ergebnisse, die auf die sensorische Vermittlung speziell kurzer Reize hinweisen, stammen aus pharmakologischen (Buhusi & Meck, 2005; Rammeyer, 1999) und neurowissenschaftlichen Untersuchungen (z. B. Lewis & Miall, 2003). Um den zweiten Teil der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese im Sinne der Logik der doppelten Dissoziation (z. B. Sternberg, 2001) nachzuweisen, müsste sich nun eine sensorische Manipulation auf die Wahrnehmung kurzer Zeitdauern auswirken, hingegen nicht auf die Verar-

beitung langer. Leider wurden sensorische Manipulationen in der Literatur wenig in Abhängigkeit von der Zeitdauer durchgeführt. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit (Rammsayer & Ulrich, 2005) fanden die Autoren, die psychophysische Untersuchungen mit unterschiedlichen Lautstärken durchführten, keine qualitativen Unterschiede zwischen der sensorischen Verarbeitung langer und kurzer Zeitdauern. Ganz offensichtlich scheinen sich Intensitätsunterschiede nicht auf die sensorische Repräsentation auszuwirken, was auch anderswo berichtet wurde (z. B. Allan, 1979).

Allerdings verwendeten alle mir bekannten Arbeiten für diese Untersuchung stets eine Modalität. Möglicherweise reicht die Manipulation nicht aus, um einen deutlichen sensorischen Effekt bei kurzen Zeitdauern zu erzielen. Daher soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob sich eine sensorische Manipulation erreichen lässt, indem die Reize in zwei verschiedenen Modalitäten dargeboten und über getrennte modalitätsspezifische Codes repräsentiert werden. Für diese Annahmen liegt Evidenz aus elektrophysiologischen Untersuchungen vor. Sie legen nahe, dass die Reizverarbeitung in einer frühen Phase modalitätsspezifisch organisiert ist. Schröger und Widmann (1998) boten Versuchspersonen gleichzeitig visuelle und auditive Reize dar, die an jeweils zwei verschiedenen Orten auftreten konnten. Die Versuchspersonen sollten auf Änderungen bei der Reizpräsentation mit einem Knopfdruck reagieren. Während des Experimentes wurden ereigniskorrelierte Potentiale, die bei der audiovisuellen Informationsverarbeitung auftraten, aufgezeichnet. Die Auswertung ergab, dass die auditive und die visuelle Information zunächst, bis zu einer Zeit von ca. 180 ms nach der Reizpräsentation, unabhängig voneinander verarbeitet werden. Im Anschluss interagieren diese Bereiche. Dies spricht dafür, dass Reize in einer

kurzen Zeitdauer zunächst modalitätsspezifisch verarbeitet werden, längere Zeitdauern dagegen nicht mehr. Weitere neuronale Befunde beschreibt z. B. Cowan (1997).

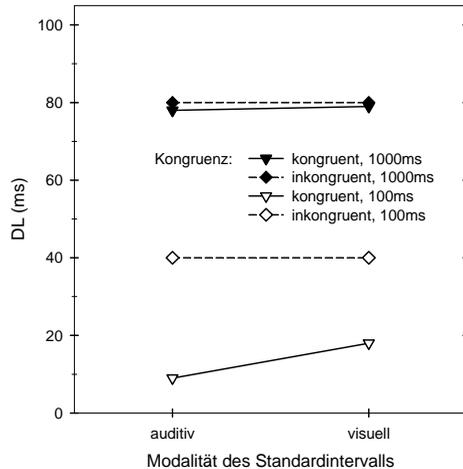


Abbildung 4: Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Diskriminationsleistung in Abhängigkeit von der Modalität des Standardintervalls und der Kongruenz.

In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, ob sich eine nach Modalitäten getrennte Verarbeitung kurzer Zeitdauern auch auf der Verhaltens-ebene nachweisen lässt. Die Vorhersagen, die aus der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese abgeleitet wurden, sind in Abbildung 4 verdeutlicht. Dabei sollte die Kongruenz der Reizdarbietung, besonders bei kurzen Reizen, einen deutlichen Effekt zeigen. Gemäß den üblicherweise gefundenen Forschungsergebnissen sollten bei kongruenter Darbietung auditive

Reize genauer diskriminiert werden als visuelle, inkongruente Durchgänge sollten dagegen insgesamt schlechter als kongruente und gleichartig diskriminiert werden. Da der Vergleich durch eine Form der Subtraktion zweier Zeiteinheiten erfolgt, sollte sich bei inkongruenten Durchgängen kein Einfluss der Reihenfolge der Modalitäten auf die Genauigkeit ergeben. Bei langen Zeitdauern sollten diese Effekte aufgrund der kognitiven Repräsentation zumindest deutlich zurückgehen.

1.3 Generalisiertes Zählermodell

Das generalisierte Zählermodell leitet sich aus den Annahmen des neuronalen Zählermodells ab. Demnach generiert ein interner neuronaler Generator Pulse, die von einem Zähler aufsummiert werden. Die Anzahl dieser Pulse, die im Zähler kumuliert sind, repräsentiert die wahrgenommene Zeitdauer eines Intervalls. Dieses neuronale Zählermodell wurde erfolgreich im zeitbezogenen Verhaltensexperimenten im Humanbereich (Benedixen, Grimm & Schröger, 2005; Killeen & Taylor, 2000; Penney, Gibbon & Meck, 2000; Rammsayer & Ulrich, 2001) und im Tierbereich (Fetterman & Killeen, 1995; Gibbon, 1977) überprüft.

Das erste quantitative Modell für Zeitdiskrimination, das auf neuronalen Zählmechanismen basiert, wurde von Creelman (1962) entwickelt. Gemäß diesem Modell ist der interne Zählmechanismus hauptsächlich dadurch charakterisiert, dass er neuronale Pulse zählt, die während der zu bestimmenden Zeitdauer auftreten. Die Pulse, so wird dabei angenommen, werden unabhängig voneinander generiert, so dass deren Rate zufällig verteilt ist. Die Anzahl $N(t)$ der Pulse, die innerhalb eines bestimmten Zeitin-

tervals aufsummiert wird, folgt einem Poisson Prozess mit der Rate λ . Dieser Prozess impliziert, dass die Interpulsabstände unabhängige und exponentialverteilte Zufallsvariablen mit einem Mittelwert und einer Standardabweichung von $1/\lambda$ darstellen.

Das neuronale Zählermodell wurde von Rammsayer und Ulrich (2001) generalisiert. Sie stellten die Hilfsannahme in Frage, der zufolge die Verteilung $N(t)$ einem Poisson - Prozess folgt. Das impliziert, dass die Interpulsabstände exponentialverteilt sein müssen (Ross, 1983), und dass das Maximum der Verteilung gleich Null ist. Diese Eigenschaften einer Exponentialfunktion sind unvereinbar mit der wohlbekanntem Tatsache, dass bei den meisten Neuronen das Aktionspotential von einer Refraktärzeit gefolgt wird, während der kein neues Aktionspotential gebildet werden kann. Daher scheint es für Zählermodelle sinnvoll, diese einschränkende Verteilungsform durch eine generellere Form zu ersetzen (Rammsayer & Ulrich, 2001).

Ein weiterer Punkt, der für die Anwendung kritisch ist, besteht darin, dass Creelman in seiner ursprünglichen Formulierung davon ausging, dass die Pulsrate für Standardintervall und Vergleichsintervall identisch ist. Diese Annahme scheint sich nicht zu bestätigen. Zum einen liegt Evidenz dafür vor, dass die Pulsrate von den Längen der verwendeten Intervalle beeinflusst wird (Killeen & Fetterman, 1988; Rammsayer & Ulrich, 2001). Zweitens werden die wiederholt gefundenen Befunde, denen zufolge auditive Intervalle sensitiver und länger wahrgenommen werden als visuelle, mit unterschiedlichen, modalitätsspezifischen Pulsraten erklärt. Dabei wird meist vermutet, dass auditive Intervalle durch eine höhere Anzahl Pulse abgebildet werden als visuelle (z. B. Penney et al., 2000; Wearden et al.,

1998). Da diese höhere Pulsanzahl die wahrgenommene Länge repräsentiert und eine höhere Pulsdichte eine präzisere Beurteilung, lässt sich mit dieser Annahme erklären, warum auditive Signale im Vergleich zu visuellen genauer und länger wahrgenommen werden. Aus diesen Gründen lässt sich die traditionelle Version des neuronalen Zählermodells nicht auf eine intermodale Zeitdiskriminationsaufgabe übertragen, bei der Standardintervall und Vergleichsintervall in unterschiedlichen Modalitäten dargeboten werden.

Die von Rammsayer und Ulrich (2001) generalisierte Version des neuronalen Zählermodells ermöglicht jedoch die Erweiterung auf unterschiedliche Modalitäten. Die Autoren formulierten die psychometrische Funktion mathematisch aus den Wahrscheinlichkeitsdichten der Pulsverteilung während eines Intervalls (Rammsayer & Ulrich, 2001). Damit wurde es möglich, für Standard- und Vergleichsintervall verschiedene Pulsdichten zugrunde zu legen. Um das Modell auf diese Situation anzupassen, wird zugrunde gelegt, dass der mittlere Interpulsabstand von auditiven Intervallen kürzer als der von visuellen ist. Auf der Basis dieser Vermutung wurde die Vorhersage der psychometrischen Funktion abgeleitet.

Für die Ableitung der psychometrischen Funktion des generalisierten Zählermodells sei t_s das Standardintervall und t_c das Vergleichsintervall. In jedem Durchgang kann t_c länger, gleich oder kürzer als t_s sein. Weiterhin soll $N(t_s)$ die Pulsanzahl sein, die während der Zeitdauer t_s gezählt wurde, und entsprechend $N(t_c)$ die Pulsanzahl, die während t_c gezählt wurde. Die Versuchspersonen sollen beurteilen, ob das Vergleichsintervall länger als das Standardintervall ist, aufgezeichnet wird also die Kurve für $N(t_c) >$

$N(t_s)$. Daraus folgt für die Antwortwahrscheinlichkeit "Vergleichsintervall $C > \text{Standardintervall } S$ ":

$$\begin{aligned}
 P\{C > S \mid t_s, t_c\} &= P\{N(t_c) > N(t_s)\} \\
 &= P\{N(t_c) - N(t_s) > 0\} \\
 &= P\{N(t_s) - N(t_c) \leq 0\} \\
 &= P\{D(t_s, t_c) \leq 0\}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Mit anderen Worten, die Antwortwahrscheinlichkeit $P\{C > S\} \mid t_s, t_c\}$ entspricht der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses, wonach $D(t_s, t_c) = N(t_s) - N(t_c)$ kleiner oder gleich Null ist. Wie bereits bei Rammsayer und Ulrich (2001) ausgeführt, ist die Anzahl der Pulse $N(t)$, die während einer bestimmten Zeit t gezählt werden, annähernd normalverteilt mit dem Erwartungswert $E[N(t)] = t/\mu$ und die Varianz $\text{Var}[N(t)] = t \cdot \sigma^2/\mu^3$. Dabei stehen die Konstanten μ und σ für den Mittelwert und die Standardabweichung der Interpulsdauer. Dieser Ausdruck beschreibt jede beliebige Pulsverteilung und dadurch sind keinerlei weitere Annahmen über die Verteilung nötig, um die Vorhersagen aus diesem Modell abzuleiten. Daraus lassen sich der Ausdruck für die Antwortwahrscheinlichkeit $P\{C > S \mid t_s, t_c\}$ und die psychometrische Funktion, die die Vorhersage darstellt, ableiten. Da $N(t_s)$ sowie $N(t_c)$ annähernd normalverteilt sind, muss ihre Differenz $D(t_s, t_c)$ ebenfalls annähernd normalverteilt sein. Daraus ergeben sich für Mittelwert und Varianz dieser Differenz:

$$E[D(t_s, t_c)] = E[N(t_s)] - E[N(t_c)] = \frac{t_s}{\mu_s} - \frac{t_c}{\mu_c} \tag{2}$$

und

$$\text{Var}[D(t_s, t_c)] = \text{Var}[N(t_s)] + \text{Var}[N(t_c)] = \frac{t_s \cdot \sigma_s^2}{\mu_s^3} + \frac{t_c \cdot \sigma_c^2}{\mu_c^3} \tag{3}$$

Die Konstanten μ_s und σ_s stellen Mittelwert und Standardabweichung der Interpulsverteilung des Zählprozesses während der Dauer des Standardintervalls dar. Die entsprechenden Konstanten für das Vergleichsintervall sind μ_c und σ_c . Aufgrund der Pulsverhältnisse von auditiven und visuellen Intervallen ist nun anzunehmen, dass $\mu_s < \mu_c$ gilt, wenn das Standardintervall auditiv und das Vergleichsintervall visuell ist. Anders herum sollte $\mu_c < \mu_s$ gelten, wenn das Standardintervall visuell und das Vergleichsintervall auditiv dargeboten werden. Da nun $D(t_s, t_c)$ annähernd normalverteilt und durch Mittelwert und Varianz der Gleichungen (2) und (3) dargestellt wird, ergibt sich aus Gleichung (1):

$$P\{''C > S'' \mid t_s, t_c\} = \Phi \left[\frac{0 - E[D(t_s, t_c)]}{\sqrt{\text{Var}[D(t_s, t_c)]}} \right] = \Phi \left[\frac{\left(\frac{t_c}{\mu_c} - \frac{t_s}{\mu_s} \right)}{\sqrt{\frac{t_s \cdot \sigma_s^2}{\mu_s^3} + \frac{t_c \cdot \sigma_c^2}{\mu_c^3}}} \right] \quad (4)$$

Hier steht Φ für die kumulierte Verteilungsfunktion einer Standardnormalverteilung. Allerdings gleicht die Form der vorhergesagten Funktion nicht der einer Standardnormalverteilung. Der Grund dafür ist, dass die Variable t_c im Zähler und im Nenner auftaucht (siehe auch Ulrich, Nitschke & Rammsayer, 2006a).

Mit diesem letzten Ausdruck lässt sich die psychometrische Funktion für die Zeitdiskriminationsaufgabe darstellen. Dabei wird die Antwortwahrscheinlichkeit gegen die Dauer des Vergleichsintervalls t_c aufgetragen. Das Beispiel in Abbildung 5 stellt psychometrische Funktionen für eine Standarddauer t_s von 100 ms und jede mögliche Kombination von Modalitäten des Standard- und des Vergleichsintervalls (auditiv - auditiv, visuell - visu-

ell, auditiv - visuell, visuell - auditiv) dar. In Übereinstimmung mit früheren Studien wurde ein geringerer Interpulsabstand für auditive als für visuelle Intervalle verwendet. Zugleich wurde eine höhere Standardabweichung für visuelle im Vergleich zu auditiven angenommen, da Evidenz dafür besteht, dass die Variabilität des Generators bei visuellen Intervallen im Vergleich zu auditiven höher ist (z. B. Wearden et al., 1998).

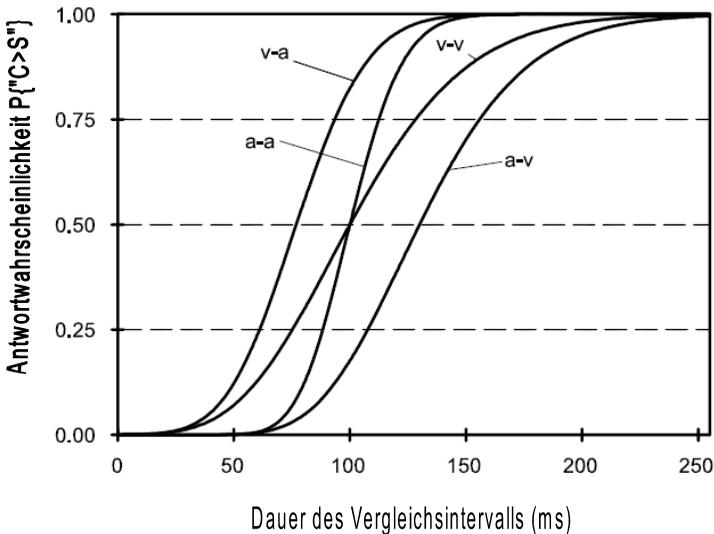


Abbildung 5: Psychometrische Funktion, die die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass das Vergleichsintervall länger als das Standardintervall beurteilt wird, in Abhängigkeit von der Dauer des Vergleichsintervalls und der Modalitäten der Durchgänge. Dabei bedeuten a: auditiv und v: visuell, entsprechend z. B. v-a: visuell - auditiv.

Auf einige bestimmte Aspekte in Abbildung 5 soll besonders hingewiesen werden. Erstens steigt die Wahrscheinlichkeit der Antwort, dass das Vergleichsintervall länger als das Standardintervall beurteilt wird, $P\{C > S \mid t_s, t_c\}$, monoton mit der Dauer t_c des Vergleichsintervalls. Zweitens ist der vorhergesagte PSE der psychometrischen Funktionen in kongruenten Durchgängen (auditiv - auditiv, visuell - visuell) identisch und entspricht der Dauer des Standardintervalls t_s . Vergleicht man die Kurven der kongruenten Durchgänge, so fällt auf, dass die visuelle (visuell - visuell) flacher verläuft als die auditive (auditiv - auditiv). Das bedeutet für die Praxis, dass auditive Reize präziser als visuelle wahrgenommen werden, was ja auch übereinstimmend in der Literatur berichtet wird. Bei inkongruenten Durchgängen ergibt sich ein anderes Bild, das von der Reihenfolge der dargebotenen Modalitäten abhängt. Wenn der auditive Reiz als Standardintervall vor den visuellen dargeboten wird, so verläuft die Kurve verhältnismäßig flacher. Das bedeutet, dass diese Durchgänge vergleichsweise schlechter diskriminiert werden sollten als die Durchgänge, bei denen der auditive Reiz dem visuellen folgt. Die beiden inkongruenten Kurven unterscheiden sich auch bezüglich ihres PSE. Wenn der visuelle Reiz an zweiter Stelle als Vergleichsintervall dargeboten wird, wird er erst dann als gleich lang wahrgenommen, wenn er physikalisch länger als das Standardintervall ist. Anders herum: Der visuelle Reiz wird insgesamt im Vergleich zum auditiven als kürzer wahrgenommen. Auch diese Vorhersage steht in Einklang mit Literaturbefunden. Auditive Vergleichsintervalle werden analog im Vergleich zum visuellen Standardintervall als länger wahrgenommen (Goldstone & Goldfarb, 1974). All diese Vorhersagen veranschaulichen die Annah-

me, dass der Generator bei auditiven Reizen schneller taktet als bei visuellen (z. B. Grondin, 2001; Wearden et al., 1998).

Die kontraintuitive Vorhersage, dass die Steigung der psychometrischen Funktion bei inkongruenten Durchgängen mit der Intervallreihenfolge auditiv - visuell flacher als die mit der Reihenfolge visuell - auditiv verläuft, lässt sich mit den längeren Interpulsabständen erklären, die bei visuellen im Gegensatz zu auditiven Intervallen angenommen werden. Mit folgender Überlegung soll das veranschaulicht werden: Wenn z. B. ein auditives Intervall im Mittel alle 5 ms getaktet wird, werden für ein Zeitintervall von 100 ms 20 Pulse generiert. Der Generator für visuelle Intervalle taktet langsamer, für dieses Beispiel soll von einem mittleren Interpulsabstand von 10 ms ausgegangen werden. Dann würden für ein Zeitintervall der gleichen Länge von 100 ms 10 Pulse generiert werden. Das Zeitintervall würde also durch 10 Pulse repräsentiert werden; ein Zeitintervall von 110 ms durch 11 Pulse. Vergleicht man das mit der auditiven Taktrate, so wird die Zeitdauer von 110 ms durch 22 Pulse repräsentiert. Damit stellt die visuelle Taktrate sozusagen ein sehr viel gröberes Maß als die auditive dar. Wenn nun ein visuelles Intervall auf ein auditives folgt, so kann es nur Unterschiede erfassen, die über 10 ms hinausgehen. Innerhalb dieser 10 ms können jedoch zwei auditive Pulse liegen, die durch den höheren Interpulsabstand des visuellen Signals nicht erfasst werden. In Zahlen ausgedrückt: Ein visuelles Vergleichsintervall kann im Bereich von 90 – 110 ms Zeitdauern von 90, 100 und 110 ms erfassen, ein auditives Vergleichsintervall jedoch im gleichen Bereich Zeitdauern von 90, 95, 100, 105 und 110 ms. Anders herum kann ein auditives Intervall ein vorangegangenes visuelles genauer erfassen, als es einem zweiten visuellen möglich wäre, da sein Maßstab wesentlich

genauer ist. Damit lässt sich der Verlauf der psychometrischen Funktion erklären, wonach die Kurve für auditiv - visuell flacher als die für visuell - auditiv verläuft. Da der Interpulsabstand der invertierten Taktfrequenz entspricht, lässt sich auch diese Darstellung durch die unterschiedliche Taktrate erläutern (siehe auch Ulrich et al., 2006a).¹

Um die Vorhersagen mit den Ergebnissen besser vergleichen zu können, wurden Werte für DL und CE aus den Formeln des generalisierten Zählermodells abgeleitet. Zunächst soll die Formel für CE betrachtet werden. CE wird als Differenz zwischen dem Wert von $t_c(0.5)$, der die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass $P\{C > S \mid t_s, t_c\} = 0.5$ ist, und der Standarddauer t_s beschrieben. Damit folgt aus Gleichung (4) für $\Phi(0) = 0.5$:

$$\frac{t_s(0.5)}{\mu_s} - \frac{t_c}{\mu_c} = 0 \quad (5)$$

Löst man die Gleichung nach $t_c(0.5)$ auf, und setzt sie in die Form $CE = PSE - t_s$ ein, so ergibt sich:

$$CE = t_s \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_s} - 1 \right) \quad (6)$$

Daraus sieht man, dass $CE = 0$ ist, wenn $\mu_c = \mu_s$. Wenn $\mu_c < \mu_s$ ist, so wird $CE < 0$ und bei $\mu_c > \mu_s$ wird $CE > 0$. DL wird üblicherweise als halbierter Interquartilabstand der zugehörigen psychometrischen Funktion definiert, also:

¹ Diese Darstellung weicht durch die Berücksichtigung des Interpulsabstandes von der der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese ab. Die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese geht davon aus, dass zwei feste Repräsentationen, die beispielsweise durch Pulsanzahlen abgebildet werden, miteinander verglichen werden, z. B. 100 und 110. Da der Interpulsabstand nicht mit berücksichtigt wird, ergibt sich auch kein Reihenfolgeeffekt, denn die absolute Differenz aus dem Beispiel beträgt immer 10.

$$DL = \frac{t_c(0.75) - t_c(0.25)}{2} \quad (7)$$

Dabei ist $t_c(0.25)$ der Wert von t_c bei $P\{C > S \mid t_s, t_c\} = 0.25$ und $t_c(0.75)$ der entsprechende bei $P\{C > S \mid t_s, t_c\} = 0.75$. Ausgehend von dieser Definition und der Gleichung (4), ergibt sich mit $z = 0.6744$ der vorhergesagte DL für das neuronale Zählermodell aus:

$$DL = \frac{z \cdot \sqrt{z^2 \cdot \sigma_c^4 \cdot \sigma_s^2 + 4 \cdot t_s \cdot \mu_c^2 \cdot \left(\mu_c^2 \cdot \sigma_s^2 / \mu_s + \mu_s \cdot \sigma_c^2 \right)}}{2 \cdot \mu_c \cdot \mu_s} \quad (8)$$

Die Ergebnisse dieser Formeln lassen sich anschaulich und mit Zahlenwerten darstellen. Die Parameter wurden so gewählt, dass die visuelle Modalität durch einen geringeren Mittelwert μ und eine höhere Standardabweichung σ im Vergleich zu den auditiven Werten beschrieben wird (siehe auch Ulrich et al., 2006a). Für auditive Intervalle wurden $\mu = 10$ ms, $\sigma = 4$ ms und für visuelle Intervalle $\mu = 13$ ms, $\sigma = 10$ ms angenommen². Eine solche Darstellung befindet sich in Abbildung 6, die die Vorhersagen als Funktion der sensorischen Modalität des Standards, der Kongruenz der Darbietung und der Standarddauer verdeutlicht.

Wie erwartet, liegen die Werte von DL für längere Zeitdauern generell über denen für kürzere. Vergleicht man die Wirkungen der Modalität des Standardintervalls auf DL, so fällt auf, dass für Durchgänge mit einem auditiven Standard geringere Werte für DL vorhergesagt werden, was für

² Modifikationen der Parameter für die Simulation ergeben keine Änderung der Effekte, sondern variieren die Verhältnisse von den kongruenten und den inkongruenten Durchgängen, wobei bezüglich DL die Interaktion bleibt. Wenn die Differenz visuell-visuell zu auditiv-auditiv geringer wird, nimmt sie zwischen auditiv-visuell und visuell-auditiv zu. Bezüglich CE ändern sich lediglich die absoluten Werte, das Muster bleibt auch bei geänderten Parameterwerten gleich.

eine höhere Genauigkeit der Zeitwahrnehmung steht. Dabei besteht ein minimaler Vorteil bezüglich der Genauigkeit für kongruente im Vergleich zu inkongruenten Durchgängen. Vor allem interagieren die Faktoren Kongruenz und Modalität des Standardintervalls deutlich. Weiter ist aus der Abbildung ersichtlich, dass, wie bereits erklärt wurde, auditiv - auditiv genauer als visuell - visuell sowie visuell - auditiv genauer als auditiv - visuell diskriminiert wird. Hier wird der vom generalisierten Zählermodell beschriebene Reihenfolgeeffekt bei inkongruenten Durchgängen deutlich. Dies zeigt einen Unterschied zu den Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese, die keinen Reihenfolgeeffekt bei inkongruenten Durchgängen annimmt. Auffällig ist im Gegensatz zu den Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese auch, dass die beschriebenen Effekte mit zunehmender Standarddauer eher stärker werden. Der untere Teil der Abbildung 6 zeigt den vorhergesagten CE. Nach den erläuterten Ableitungen wurde erwartet, dass CE für kongruente Durchgänge Null ist, und bei inkongruenten erheblich davon abweicht. Für Durchgänge mit der Intervallfolge auditiv - visuell wird ein positiver, für die Folge visuell - auditiv ein negativer CE vorhergesagt. Das generalisierte Zählermodell sagt weiterhin eine Zunahme der absoluten Werte von CE mit wachsender Standarddauer vorher.

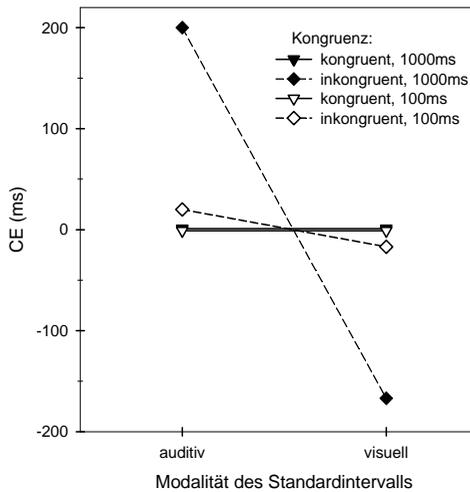
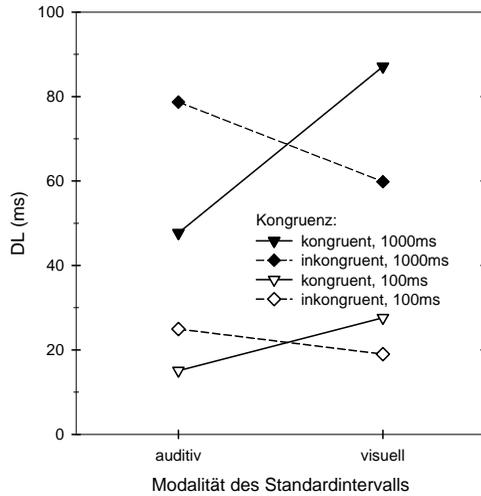


Abbildung 6: Vorhersagen für DL und CE als Funktion der Modalität des Standardintervalls, der Kongruenz und der Standarddauer.

1.4 Zusammenfassung und Zielsetzung

Die wesentlichen Unterschiede der beiden Modelle zur inneren Repräsentation von Zeitdauern werden beim Vergleich von Abbildung 4 und Abbildung 6 deutlich. Die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese sagt erstens vorher, dass sich der Einfluss der Modalitäten, der durch die Kongruenz ausgedrückt wird, nicht auf die Zeitwahrnehmung langer Zeitdauern auswirken sollte. Lange Zeitdauern sollten unabhängig von der kongruenten oder inkongruenten Darbietungsform stets gleich genau diskriminiert werden. Bei kurzen Zeitdauern sollten inkongruente Durchgänge grundsätzlich ungenauer als kongruente diskriminiert werden, da ihre Verarbeitung wie die Verarbeitung langer Zeitdauern zusätzliche Prozesse erforderlich macht. Ferner sollte sich die Reihenfolge, in der die Modalitäten in einem Durchgang präsentiert werden, nicht auf die Genauigkeit auswirken, da die zeitbezogene Information in Kodes als Zeiteinheit oder Impulsanzahl repräsentiert wird. Im Gegensatz dazu postuliert das neuronale Zählermodell, dass lange und kurze Zeitdauern gleichartig repräsentiert werden. Der Kongruenzeffekt sollte dabei eher schwach ausfallen. Zweitens sagt das Zählermodell eine Wechselwirkung zwischen der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls vorher. Damit beeinflusst die Reihenfolge der Modalitäten in einem Durchgang die Diskriminationsleistung. Durchgänge mit einem auditiven Vergleichsintervall werden grundsätzlich genauer diskriminiert als solche mit einem visuellen. Das neuronale Zählermodell sagt damit vorher, dass es sich bei dem Vergleich zweier Repräsentationen nicht um einen numerischen Subtraktionsprozess zweier Repräsentationen von Zeiteinheiten handelt. Denn dann müssten die inkongruenten Durchgänge wie bei den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese

gleich genau diskriminiert werden. Die Vorhersagen für CE ergaben, wieder für beide Zeitdauern, dass Intervalle von kongruenten Durchgängen gleichlang wahrgenommen werden, bei inkongruenten Durchgängen sollte ein visuelles Intervall kürzer als ein auditives wahrgenommen werden. Dieser Effekt sollte bei langen Zeitdauern deutlich zunehmen.

2. Experiment 1: Kongruente vs. inkongruente Durchgänge

Mit dem ersten Experiment sollte grundsätzlich überprüft werden, ob eine der beiden Hypothesen geeignet ist, die Einflüsse der auditiven und visuellen Modalität auf die Wahrnehmung von langen und kurzen Zeitdauern abzubilden. Als Methode bietet sich, wie bereits dargelegt, die Zeitdiskrimination mit zwei Modalitäten und zwei Standarddauern an, wobei die Zeitdauern 100 ms für kurze und 1000 ms für lange Intervalle betragen. Da die Kombination der auditiven und visuellen Modalitäten in einem Durchgang zwischen den beiden Hypothesen diskriminiert, wurde die Manipulation durch die sensorische Kongruenz erzeugt. Dazu wurden die visuelle und die auditive Modalität zu zwei Kongruenzbedingungen zusammengefasst. In der ersten, der kongruenten Bedingung wurden die beiden Intervalle, die miteinander verglichen werden sollten, jeweils in der gleichen Modalität präsentiert, d. h. auditiv - auditiv oder visuell - visuell; in der zweiten, der inkongruenten Bedingung wurden die beiden Intervalle in verschiedenen Modalitäten dargeboten, d. h. visuell - auditiv oder auditiv - visuell. Gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese wurde erwartet, dass sich die Kongruenz nur bei kurzen Intervallen auf die Diskriminationsleistung auswirkt. Damit sollten kurze kongruente Intervalle wesentlich genauer diskriminiert werden können als kurze inkongruente. Dieser Effekt sollte sich jedoch bei langen Intervallen nicht bemerkbar machen, d. h. kongruente Intervalle sollten in gleicher Weise wie inkongruente diskriminiert werden. Im Gegensatz dazu sagen die psychometrischen Funktionen des Zählermodells vorher, dass die Verarbeitung langer und kurzer Zeitdauern prinzipiell gleichartig verläuft. Kongruente Durch-

gänge sollten sich etwas genauer als inkongruente diskriminieren lassen. Zusätzlich sollte sich die Kongruenz von der Modalität des Standardintervalls modulieren lassen, indem kongruente Durchgängen mit einem auditiven Standardintervall, inkongruente jedoch mit einem visuellen Standardintervall genauer diskriminiert werden sollten.

In der vorliegenden Arbeit wurden gefüllte Intervalle verwendet. Der Grund ist, dass speziell der Einfluss der Modalitäten auf die Zeitwahrnehmung überprüft werden sollte und dass dieser Einfluss sich bei langen und kurzen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zufolge unterschiedlich auswirken sollte. Damit ist es sinnvoll, die sensorische Information während der gesamten Intervalldauer konstant zu halten.

Es wurde ein dreifaktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf den Faktoren Standarddauer (100 ms und 1000 ms), Kongruenz (Kongruent: visuell - visuell sowie auditiv - auditiv, Inkongruent: visuell - auditiv sowie auditiv - visuell) sowie Modalität des Standardintervalls (auditiv und visuell) verwendet. Gemessen wurden die Unterschiedsschwelle DL und der konstante Fehler CE.

2.1 Methode

Versuchspersonen. Es nahmen 20 Versuchspersonen teil, 17 Frauen und 3 Männer. Die jüngste Versuchsperson war 19, die älteste 40 Jahre alt ($M = 25.4$, $SD = 5.0$). Alle Versuchspersonen verfügten über normale visuelle und auditive Fähigkeiten. Es handelte sich um Studenten der Universität Tübingen. Für ihre Versuchsteilnahme wurden sie wahlweise mit 7.50 €

bezahlt oder sie erhielten eine Bescheinigung über je eine abgeleistete Versuchspersonenstunde.

Apparatur. Das Experiment fand in einem experimentalpsychologischen Labor statt, das abgedunkelt und schallgeschützt war. Die Darbietung der visuellen und auditiven Stimuli sowie die Aufzeichnung der Antworten der Versuchspersonen wurde von einem IBM - kompatiblen Computer gesteuert. Die Versuchsperson saß an einem Tisch vor dem Computerbildschirm. Die visuellen Intervalle wurden von einer grünen Leuchtdiode mit einem Durchmesser von 3 mm entsprechend $0,48^\circ$ präsentiert. Ihre Leuchtstärke betrug ca. $0,95 \text{ mcd}$ bei einer Leuchtdichte von 48 cd/m^2 . Die Leuchtdiode wurde an einer Plexiglasstange direkt vor der Bildschirmmitte angebracht und über den Druckeranschluss des Computers (LTP1) mit Hilfe eines speziellen Verstärkers angesteuert. Die Bildschirmmitte war durch einen Fixationspunkt gekennzeichnet, der zwischen den Durchgängen ein- und während der Stimuluspräsentation ausgeblendet wurde. Die auditiven Intervalle bestanden aus einem weißen Rauschsignal, das von einer Soundblaster - kongruenten Soundkarte erzeugt wurde. Sie wurden über Kopfhörer (Sony MDR-CD 590) mit einer Lautstärke von $55,7 \text{ dB (SPL)}$ dargeboten. Die Dauer der Intervalle wurde mit geeigneten Messgeräten überprüft, wobei die zeitliche Abweichung von den angegebenen Werten unter einer halben Millisekunde lag.

Die Antworteingabe erfolgte über zwei Antworttasten der Standardtastatur des PCs. Für Rechtshänder waren dies die Tasten "1" sowie "3" des Zahlenblocks und für Linkshänder die Tasten "<" sowie "x". Die jeweils dazwischenliegende Taste, "2" bzw. "y", war die Starttaste, mit der die Versuchsperson einen neuen Durchgang einleiten konnte. Während des

Experimentes ruhten Zeige-, Mittel- und Ringfinger der jeweils dominanten Hand auf den entsprechenden drei Tasten.

Für die Antworttasten war auf dem Bildschirm eine Zuordnungshilfe eingeblendet. Sie befand sich je nach Händigkeit der Versuchsperson unten rechts oder unten links und blieb das ganze Experiment über eingeblendet. Darin wurde zum einen darauf hingewiesen, dass der jeweils zweite Reiz beurteilt werden sollte. Dies erfolgte durch den Ausdruck "2. Reiz ist". Darunter standen, je nach Zuordnung der Tasten, nebeneinander die Wörter "kürzer - länger" oder "länger - kürzer".

Durchführung. Jede Versuchsperson nahm an einer Sitzung teil, die ungefähr 55 min dauerte. Sie bestand aus zwei Trainings- und acht Experimentalblöcken. Der Ablauf eines Versuchsdurchgangs ist in Abbildung 7 dargestellt: Nach dem Betätigen der Starttaste wurde nach 1000 ms zunächst immer das Standardintervall präsentiert. Darauf folgte nach einem Interstimulusintervall von 1000 ms das Vergleichsintervall. In der Bedingung "Zeitdauer kurz" betrug die Standarddauer 100 ms, in der Bedingung "Zeitdauer lang" 1000 ms. Diese beiden Bedingungen wurden blockweise manipuliert und über die Versuchspersonen ausbalanciert. Dadurch absolvierte die eine Hälfte aller Versuchspersonen zuerst vier Blöcke mit kurzen Standarddauern (100 ms) und danach vier weitere Blöcke mit langen Standarddauern (1000 ms). Die andere Hälfte aller Versuchspersonen absolvierte diese Blöcke in der umgekehrten Reihenfolge. Die Kongruenzbedingung wurde innerhalb der Blöcke manipuliert. In der Bedingung "kongruent" wurden die beiden zu vergleichenden Intervalle in der gleichen Modalität dargeboten, es folgten also zwei visuelle oder zwei auditive Intervalle aufeinander. In der Bedingung "inkongruent" wurden die beiden aufeinander

folgenden Intervalle in verschiedenen Modalitäten dargeboten: Visuell - auditiv oder auditiv - visuell. Auf diese Weise sah der Versuchsplan vier Experimentalbedingungen vor: (a) kurz - kongruent, (b) kurz - inkongruent, (c) lang - kongruent und (d) lang - inkongruent. Diese vier Bedingungen kamen innerhalb eines Blocks gleich häufig und in zufälliger Reihenfolge vor.

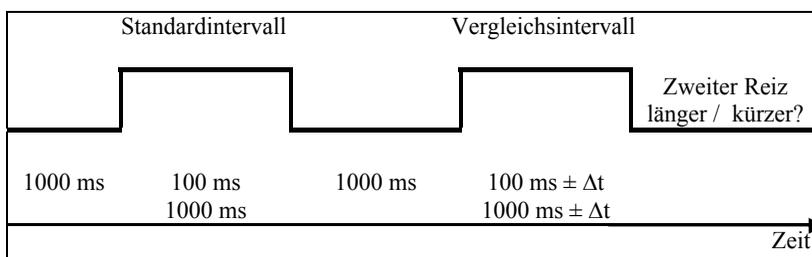


Abbildung 7: Ablauf eines Durchgangs nach der Methode der Zeitdiskrimination, wobei das variable Vergleichsintervall dem Standardintervall folgt. Die Vorperiode und das Interstimulusintervall haben eine konstante Länge von je 1000 ms, die Standarddauern von 100 ms bzw. 1000 ms. Bei kongruenten Durchgängen sind die beiden Intervalle gleicher Modalität, also auditiv - auditiv und visuell - visuell. Inkongruente Durchgänge bestehen aus zwei unterschiedlichen Modalitäten, auditiv - visuell oder visuell - auditiv.

Die Versuchspersonen mussten die Dauer der beiden Intervalle, die hintereinander dargeboten wurden, miteinander vergleichen. Dabei wurde zunächst immer das Standardintervall mit einer festen Dauer von 100 ms bzw. 1000 ms präsentiert. Das darauf folgende Vergleichsintervall variierte in seiner Dauer von Durchgang zu Durchgang so minimal, dass es vom Standardintervall kaum zu unterscheiden war. Die Position des Standardintervalls konnte von den Versuchspersonen nicht erkannt werden und war

ihnen nicht bekannt. Die Versuchspersonen mussten entscheiden, ob der zweite Reiz länger oder kürzer als der erste war, indem sie eine der beiden Antworttasten drückten. Für diese Entscheidung gab es keine zeitliche Begrenzung. Die Zuordnung der Antworttasten "länger" und "kürzer" war über die Versuchspersonen hinweg balanciert und blieb innerhalb einer Experimentalsitzung gleich.

Adaptive Anpassung des Vergleichsintervalls. Die Dauer des Vergleichsintervalls wurde von Durchgang zu Durchgang nach den Regeln des "Weighted Up – Down" Verfahrens (Kaernbach, 1991) variiert. Bei dieser adaptiven psychophysischen Methode wird das Vergleichsintervall in Abhängigkeit vom Urteil um einen festen Betrag verlängert oder verkürzt. Dadurch erreicht man, dass das Verfahren um ein bestimmtes Perzentil herum oszillieren kann. Ein Perzentil ist die Intervallausprägung, d.h. in diesem Zusammenhang die Dauer des Vergleichsintervalles, bei der eine Versuchsperson mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein vorher festgelegtes Urteil, z. B. "länger", abgibt. In der vorliegenden Studie wurden das 25. und das 75. Perzentil angestrebt. Das sind die Dauern des Vergleichsintervalles, bei denen die Versuchsperson mit einer Wahrscheinlichkeit von .25 bzw. von .75 das Urteil "länger" abgibt. Zur Schätzung dieser beiden Perzentile beträgt das Verhältnis der Maße für die Verlängerung und Verkürzung der Vergleichsintervalle 1:3 (Kaernbach, 1991). Beurteilt die Versuchsperson einen Vergleichsintervall, mit dem das 25. Perzentil abgeschätzt wird, als kürzer, so wird die Dauer des Vergleichsintervalles um einen einfachen Betrag (z. B. 5 ms) erhöht. Beurteilt sie ihn als länger, so wird er um den dreifachen Betrag (z. B. 15 ms) erniedrigt. Zur Abschätzung des 75. Perzentils wird das Vergleichsintervall nach dem Urteil "länger" um

den einfachen Betrag verkürzt und bei dem Urteil "kürzer" um den dreifachen verlängert (siehe auch Ulrich, Nitschke & Rammsayer, 2006b).

Bei der Wahl der Schrittweiten, mit denen das Vergleichsintervall verlängert oder verkürzt wird, müssen die unterschiedlichen Standarddauern und Modalitätsbedingungen berücksichtigt werden. Bezüglich der Intervalldauern ist zu beachten, dass kürzere Intervalle generell besser diskriminiert werden als lange (z. B. Allan, 1979; Getty, 1975). In dem vorliegenden Experiment muss zusätzlich die Kongruenzbedingung, d. h. die kongruente und inkongruente Präsentation der Intervalle, berücksichtigt werden. Generell werden bei gleichlangen Stimulusdauern visuelle Intervalle im Vergleich zu auditiven kürzer beurteilt (z. B. Goldstone & Lahmon, 1974), und auditive Intervalle werden genauer diskriminiert (z. B. Grondin, 1993; Grondin, Meilleur-Wells & Ouelette, 1998; Wearden et al., 1998). Einen Anhaltspunkt für die Festlegung der Schrittweiten liefert der Weberbruch. Danach ist das Verhältnis von DL zu Standardintervall konstant. Mattes und Ulrich (1998) ermittelten für auditive Intervalle eine Weberkonstante von 0.09 und für visuelle Intervalle 0.24. Die Werte 0.09 bzw. 0.24 wurden für die Berechnung der Schrittweiten bei den kongruenten Modalitätsbedingungen zugrunde gelegt. Für die inkongruente Modalitätsbedingung wurden die Schrittweiten mit dem Faktor 0.3 berechnet, da beiden Hypothesen zufolge davon auszugehen ist, dass die Diskrimination in dieser Bedingung zusätzlich erschwert ist. Das ergibt nun die in Tabelle 1 aufgeführten Schrittweiten.

Das erste Vergleichsintervall jeder Sequenz, der Startwert, wurde in Abhängigkeit von Intervallbedingung und Standarddauer festgelegt. Für den Startwert wurde eine Schrittweite zugrunde gelegt, die den doppelten Wert

der langen Schrittweite betrug, also z. B. 180 ms bei der Modalitätsbedingung auditiv - auditiv und der Standarddauer von 1000 ms. Für den Startwert zur Schätzung des 25. Perzentils wurde die entsprechende doppelte Schrittweite von der Dauer des Standardintervalls abgezogen. Analog wurde der Startwert zur Schätzung des 75. Perzentils gebildet, indem die doppelte Schrittweite der Dauer des Standardintervalls hinzugefügt wurde.

Tabelle 1: Schrittweiten $x / 3 \cdot x$ für kurze (100 ms) und lange (1000 ms) Standarddauern

Standarddauer	visuell-visuell	auditiv-auditiv	auditiv-visuell bzw. visuell-auditiv
100 ms	8 / 24 ms	3 / 9 ms	10 / 30 ms
1000 ms	80 / 240 ms	30 / 90 ms	100 / 300 ms

Das Weighted Up - Down Verfahren wurde für alle vier Bedingungen pro Experiment durchgeführt, was zu insgesamt acht adaptiven Sequenzen pro Standarddauer führte. Zwischen diesen acht Sequenzen wurde in zufälliger Reihenfolge gewechselt. Dadurch war es für die Versuchspersonen unmöglich, den adaptiven Charakter des Verfahrens zu erkennen.

Jede Versuchsperson begann mit zwei Trainingsblöcken, die aus jeweils 48 Trainingsdurchgängen bestanden. Im ersten Trainingsblock sollten die Versuchspersonen mit den unterschiedlichen Versuchsbedingungen vertraut gemacht werden. Dazu wurden die Trainingsdurchgänge nach den Bedingungen Standarddauer und Kongruenz geblockt. Zunächst wurden jeweils sechs Durchgänge für jede einzelne Kongruenzbedingung mit einer Standarddauer durchgeführt. Darauf folgten erneut jeweils sechs Durchgänge pro Kongruenzbedingung, diesmal in der anderen Standarddauer. Die

Vergleichsintervalle wurden um die entsprechenden Startwerte verlängert bzw. verkürzt und in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Nach diesem ersten folgte der zweite Trainingsblock, in dem die vier Kongruenzbedingungen wie im Experimentalablauf in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Die Dauer der Vergleichsintervalle wurde von Durchgang zu Durchgang nach den Regeln des Weighted Up - Down Verfahrens (Kaernbach, 1991) verlängert bzw. verkürzt. Die Bedingung Standarddauer war geblockt, so dass jeweils 24 Durchgänge pro Standarddauer hintereinander durchgeführt wurden. Nach diesem Training begann das eigentliche Experiment.

Die Versuchspersonen wurden vor dem Experiment dahingehend instruiert, dass ihnen in jedem Durchgang zwei Intervalle präsentiert wurden, die in jeder Kombination der auditiven und visuellen Modalität auftreten konnten und sich hinsichtlich ihrer Länge immer unterschieden. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, so genau wie möglich zu beurteilen, ob der zweite der beiden Intervalle länger oder kürzer als der erste war. Dabei wurden sie ausdrücklich instruiert, nur auf die Genauigkeit ihrer Antwort zu achten, nicht auf die Zeit, die sie dafür benötigten.

Nach jedem Experimentalblock erschien auf dem Bildschirm eine Tabelle, die die Versuchsperson über ihre Unterschiedsschwelle informierte. Dies geschah in Form des mit 100 multiplizierten Weber - Bruchs. Dazu wurden die Dauern aller Vergleichsintervalle, die über das Weighted Up - Down Verfahren, d. h. also letztlich durch das Urteil der Versuchsperson gebildet worden waren, gemittelt. Der Betrag der Differenz zwischen diesem Mittelwert und der Standarddauer bezogen auf die Standarddauer bildete den Weberbruch. Der Wertebereich, der den Versuchspersonen angegeben wurde, wurde auf 5 – 55 eingegrenzt. Die Versuchspersonen wurden in

der Instruktion darüber informiert, dass kleine Werte eine gute Leistung bedeuteten. Ein entsprechender Hinweis "Genauigkeit der Zeitbeurteilung, Werte von 5 (+++) bis 55 (---)" wurde bei jedem Block - Feedback über der Tabelle eingeblendet.

Insgesamt wurden 384 Experimentaldurchgänge durchgeführt, und zwar 192 Durchgänge mit kurzen und 192 Durchgänge mit langen Standardintervallen. Von den 192 Durchgängen waren jeder Kongruenz- und jeder Inkongruenzbedingung 48 Durchgänge zugeordnet. Die 384 Durchgänge waren in acht Blöcke (à 48 Durchgänge) aufgeteilt.

Schätzung von PSE, DL und CE. Mittels einer Maximum - Likelihood - Schätzung wurden für jede Versuchsperson der Punkt subjektiver Gleichheit PSE und die Unterschiedsschwelle DL bestimmt. Hierzu wurde eine logistische psychometrische Funktion der Form $p(U = 1|d_i) = 1 / (1 + \exp[(PSE - d_i) / (0.91 \cdot DL)])$ eingesetzt. Dabei bezeichnet U das Urteil mit $U = 0$, wenn der Vergleichsintervall kürzer als der Standard eingeschätzt wurde, und mit $U = 1$, wenn der Vergleichsintervall länger eingeschätzt wurde. Der Parameter d_i steht für die Dauer des i -ten Vergleichsintervalles. Als Schätzungen für PSE und DL wurden die Werte bestimmt, die die zugehörige Likelihood - Funktion maximierten. Diese Parameter wurden für jede Kombination von Standarddauer und Kongruenz der Intervallmodalitäten bestimmt. Aus PSE wurde der konstante Fehler CE als Differenz von subjektiver und objektiver Gleichheit der Zeitdauern definiert, also $CE = PSE - \text{Standarddauer}$.

2.2 Ergebnisse

Die beiden Trainingsblöcke wurden als Übung betrachtet und nicht ausgewertet. Aus den Experimentaldurchgängen wurden für jede Versuchsperson und jede Bedingung die Parameter DL und CE nach der oben beschriebenen Methode geschätzt. Über die drei Faktoren Standarddauer (100 vs. 1000 ms), Kongruenz (kongruent vs. inkongruent) und Modalität des Standardintervalls (auditiv vs. visuell) wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) für DL und CE gerechnet. Abbildung 8 zeigt die durchschnittliche Unterschiedsschwelle DL sowie den konstanten Fehler CE als Funktion der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls³. Die Ergebnisse zeigen ein Muster, das dem der Vorhersage des neuronalen Zählermodells ähnelt. Einerseits zeigt sich bezüglich DL das gleiche Muster für lange und kurze Zeitdauern. Außerdem scheint die Kongruenz von der Modalität des Standardintervalls moduliert zu werden. Die Diskriminationsleistung liegt bei kongruenten Durchgängen niedriger, wenn ein auditives Standardintervall statt einem visuellen verwendet wurde. Bei inkongruenten Durchgängen verhält es sich anders herum, die Werte für DL liegen niedriger, wenn ein visuelles statt einem auditiven Standardintervall präsentiert wurde. Auch bezüglich CE zeigte sich ein Muster, das dem der Vorhersage des Zählermodells ähnelt. Während bei kongruenten und kurzen inkongruenten Durchgängen eine geringe Abweichung von ihrer tatsächlichen Dauer wahrgenommen wurde, zeigte sich bei langen inkongruenten der erwartete deutliche Effekt, dem zufolge visuelle Intervalle kürzer als auditive eingeschätzt wurden.

³ Die Fehlerbalken innerhalb der Abbildungen entsprechen dem Standardfehler des Mittelwertes.

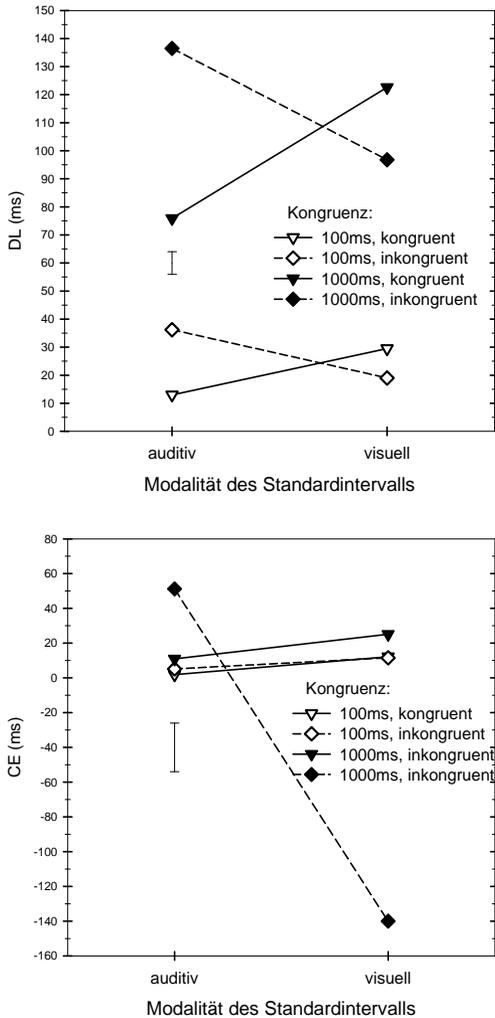


Abbildung 8: Ergebnisse von Experiment 1: DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls.

Unterschiedsschwelle DL. Wie aufgrund des Weberschen Gesetzes zu erwarten war, nahm DL mit der Dauer des Standardintervalls zu, $F(1,19) = 207.2, p < .001$. Die Mittelwerte für DL betragen 24 ms für die kurze und 108 ms für die lange Standarddauer. Dies steht auch im Einklang mit beiden Hypothesen. Die Diskriminationsleistung war in der kongruenten Bedingung signifikant besser als in der inkongruenten, $F(1,19) = 10.1, p = .005$. Die Mittelwerte für DL betragen 60 bzw. 72 ms. Das theoretisch bedeutsamste Ergebnis bestand darin, dass dieser Kongruenzeffekt nicht signifikant mit der Dauer des Standardintervalls variierte, $F(1,19) = 2.7, p = .116$. Genauer gesagt ergab sich ein signifikanter Kongruenzeffekt nicht nur für die kurzen Standarddauern, $t(19) = 2.37, p = .028$ (21 vs. 27 ms) sondern auch für die langen, $t(19) = 2.63, p = .017$ (99 vs. 117 ms). Dies Ergebnis widerspricht klar den Vorhersagen, die aus der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese abgeleitet wurden. Denn gemäß den Vorhersagen hätte sich der Kongruenzeffekt bei kurzen, nicht jedoch bei langen Standardintervallen einstellen sollen. Wie Abbildung 8 vermuten lässt, beeinflusste die Modalität des Standardintervalls den Kongruenzeffekt, $F(1,19) = 22.4, p < .001$. Dieser Interaktionseffekt nahm mit steigender Dauer des Standardintervalls sogar noch zu, $F(1,19) = 5.6, p = .029$. Es ergab sich kein Einfluss der Modalität des Standardintervalls auf die Diskriminationsleistung, weder bei langen noch bei kurzen Standarddauern, $F < 1$. Die Durchschnittswerte für DL betragen 65 ms bei dem auditiven Standardintervall und 67 ms bei dem visuellen. Dabei entspricht das Ergebnismuster in Größe und Richtung der Effekte tendenziell den Vorhersagen des neuronalen Zählermodells, denn DL nahm höhere Werte an, wenn ein auditives Standardintervall mit einem visuellen Vergleichsintervall zu einer inkon-

gruente Bedingung kombiniert wurde, als wenn es kongruent mit einem auditiven Vergleichsintervall dargeboten wurde, und umgekehrt. Die Werte für DL sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Diskriminationsleistungen über beide Standarddauern hinweg in Abhängigkeit von der Modalität des Standardintervalls und der Kongruenz.

Kongruenz	Standardintervall visuell	Standardintervall auditiv
kongruent	76 ms	44 ms
inkongruent	58 ms	86 ms

Aus diesen Werten lässt sich ablesen, dass Durchgänge mit einem visuellen Vergleichsintervall generell schlechter diskriminiert wurden als solche mit einem auditiven. Um diesen Effekt zu veranschaulichen, wurde eine weitere ANOVA, diesmal über die Faktoren Dauer des Standards (100 ms und 1000 ms), Modalität des Standardintervalls (auditiv und visuell) sowie Modalität des Vergleichsintervalls (auditiv und visuell) gerechnet. Damit lässt sich der vorhergesagte Einfluss der Modalität des Vergleichsintervalls verdeutlichen, $F(1,19) = 22.4$, $p < .001$. Dieser Effekt war vom neuronalen Zählermodell vorhergesagt worden und nahm mit der Standarddauer sogar zu, $F(1,19) = 5.6$, $p = .029$. (Die Interaktion zwischen der Modalität des Standard- und der des Vergleichsintervalls bestätigt den Kongruenzeffekt mit $F(1,19) = 10.1$, $p = .005$). Insgesamt sprechen die Ergebnisse in mehrfacher Hinsicht gegen die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese und bestätigen zumindest das Muster der Vorhersagen des Countermodells.

Konstanter Fehler CE. Abgesehen vom verfehlten Haupteffekt auf die Standarddauer, $F(1,19) = 1.1$, $p = .314$, erzielten alle anderen Faktoren

und ihre Interaktionen statistisch signifikante Ergebnisse. Die Modalität des Standardintervalls produzierte einen Haupteffekt, $F(1,19) = 11.4, p = .003$. Die Versuchspersonen tendierten offensichtlich dazu, auditive Zeitdauern im Vergleich zu visuellen zu überschätzen (25 vs. -31 ms). Dies repliziert zahlreiche Befunde, denen zufolge auditive Intervalle länger als visuelle wahrgenommen werden (z. B. Goldstone & Lhamon, 1974; Wearden et al., 1998). Dieser Effekt verstärkte sich mit zunehmender Standarddauer, $F(1,19) = 10.5, p = .004$, was auch in Einklang mit früheren Befunden steht (z. B. Allan & Gibbon, 1994; Goldstone & Goldfarb, 1964; Grondin, 2001). Außerdem war der Haupteffekt der Kongruenz signifikant, $F(1,19) = 6.4, p = .020$, die Werte für CE unterschieden sich deutlich zwischen kongruenten und inkongruenten Durchgängen (12 vs. -18 ms). Beide Haupteffekte sind prinzipiell eine Folge der Interaktion zwischen der Modalität der Standarddauer und der Kongruenz, $F(1,19) = 6.5, p = .019$. Diese Interaktion wurde zusätzlich durch die Standarddauer moduliert, $F(1,19) = 9.7, p = .006$. Der Unterschied zwischen kongruenten und inkongruenten Durchgängen trat damit bei langen Zeitdauern stärker auf, was in gewissem Widerspruch zu den Vorhersagen des Zählermodells steht, das ja gleichartige Verarbeitung langer und kurzer Zeitdauern annimmt. Möglicherweise entstand dieser Effekt jedoch durch ungenügende statistische Power. Um die Ergebnisse anders darzustellen und zu verdeutlichen, wurde analog zu DL eine weitere ANOVA, diesmal über die Faktoren Dauer des Standards (100 und 1000 ms), Modalität des Standardintervalls (auditiv und visuell) sowie Modalität des Vergleichsintervalls (auditiv und visuell) gerechnet. Der Einfluss der Modalität des Vergleichsintervalls zeigte sich auch bezüglich CE, $F(1,19) = 6.6, p = .019$. Er nahm erwartungsgemäß mit der Standard-

dauer zu, $F(1,19) = 9.8, p = .006$. Diese Darstellung der Ergebnisse verdeutlicht noch einmal, dass beide Modalitäten, die des Standard- wie die des Vergleichsintervalls die wahrgenommene Zeitdauer beeinflussen. Alles in allem wurden die Effekte bezüglich CE besonders bei langen Intervallen deutlich, wie es auch vom Zählermodell vorhergesagt worden war.

2.3 Diskussion

In diesem ersten Experiment sollte untersucht werden, ob sich die internen Repräsentationen bei der Zeitwahrnehmung eher durch die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese oder durch die des generalisierten Zählermodells abbilden lassen. Zu diesem Zweck wurden kongruente Durchgänge inkongruenten gegenübergestellt. Gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese sollte sich bei kurzen Zeitdauern ein eindeutiger Wahrnehmungs- und Genauigkeitsvorteil der kongruenten gegenüber den inkongruenten Durchgängen ergeben. Bei der Verarbeitung langer Intervalle sollte dieser Unterschied nicht auftreten. Das Zählermodell sagte dagegen für alle Zeitdauern ein gleichartiges Muster vorher, das eine wechselseitige Abhängigkeit von der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls darstellte.

Sensorisch - kognitive Kodierungshypothese. Aus den Ergebnissen lässt sich sagen, dass inkongruente Durchgänge schlechter diskriminiert wurden als kongruente. Besonders bedeutsam ist dabei das Ergebnis, dass dieser Kongruenzeffekt nicht nur bei kurzen, sondern auch bei langen Standarddauern auftrat. Damit konnte bestätigt werden, dass kurze Zeitdauern im Millisekundenbereich so kodiert werden, dass die sensorischen Charak-

teristika der Repräsentation erhalten bleiben. Diese Interpretation legt nahe, dass die Codes innerhalb eines einzigen Speichersystems leichter zu diskriminieren sind als die von zwei verschiedenen Systemen. Allerdings sprechen die Ergebnisse gegen die Annahme, dass die zeitliche Repräsentation bei langen Zeitdauern auf amodalen Codes beruht, die nicht mehr von den spezifischen Inputsystemen abhängen. Diese Schlussfolgerung wurde erhärtet, weil in den Befunden der Kongruenzeffekt durch die Modalität des Standardintervalls moduliert wurde, und zwar insbesondere bei langen Standardintervallen. Ein zweiter Aspekt, der gegen die Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese spricht, liegt darin, dass der Kongruenzeffekt von der Modalität des Standardintervalls beeinflusst wurde. Dies spricht gegen die Annahme, dass sich die Diskrimination zweier Zeitdauern von unterschiedlicher Modalität als Subtraktionsprozess zweier Größen darstellen lässt. Bei einem Subtraktionsprozess zweier Repräsentationen von Zeiteinheiten dürften sich die inkongruenten Durchgänge in der Genauigkeit nicht voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse von CE sprechen ebenfalls deutlich gegen die Annahme, dass lange Zeitdauern unabhängig von einem spezifischen Inputsystem vermittelt werden. Obgleich die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese keine Vorhersagen bezüglich CE machte, weist das Ergebnis dahin, dass in die Verarbeitung langer Zeitdauern auch modalitätenbezogene Informationen miteinfließen und steht damit in klarem Widerspruch zur sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese.

Generalisiertes Zählermodell. Ein theoretisch wichtiges Ergebnis des ersten Experimentes besteht darin, dass sich keine prinzipiellen Unterschiede in der Verarbeitung langer versus kurzer Zeitdauern ergaben, wobei

die Effekte bei langen deutlich zunahmen. Auffällig ist auch, dass sich die Vorhersagen bestätigten, wonach die Kongruenz von der Modalität des Standardintervalls beeinflusst wird. Nicht nur bei kongruenten, sondern auch bei inkongruenten Durchgängen zeigt sich damit deutlich, dass die Reihenfolge der Modalitäten bei der Darbietung die wahrgenommene Genauigkeit beeinflusst. Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass sich die Vorgänge, die bei einer Zeitdiskrimination ablaufen, nicht ausreichend durch eine reine Subtraktion abbilden lassen. Noch deutlicher wird das, indem die Ergebnisse bezüglich DL Hinweise dafür geben, dass sich die Modalität des Vergleichsintervalls deutlicher auf die Genauigkeit auswirkt als die des Standardintervalls. Das weist darauf hin, dass die beiden Intervalle möglicherweise bei der internen Verarbeitung unterschiedlich gewichtet werden. Auf diesen Effekt wurde bereits in der Literatur hingewiesen (Hellström, 2003; Hellström & Rammsayer, 2004). Auch für CE konnten die aus dem Zählermodell abgeleiteten Vorhersagen tendenziell gut bestätigt werden. Den Ergebnissen zufolge beeinflussen die Modalitäten beider Intervalle deutlich die wahrgenommene Länge. Dies ist ein interessanter Aspekt, denn es liegen bisher kaum Modelle für die Zeitverarbeitung vor, die einerseits bezüglich der Reihenfolge der Reizdarbietung sowie außerdem bezüglich CE und DL Vorhersagen treffen können.

Zusammenfassung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells die Daten am besten erklären können. Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass sich die wechselseitigen Einflüsse der Kongruenz und der Modalitäten von Standard- und Vergleichsintervall gut durch die Verknüpfung von Verteilungsfunktionen darstellen lassen. Damit bietet das Zählermodell in seiner generalisierten

Form interessante neue Forschungsperspektiven. Allerdings fiel gerade in dem kurzen Zeitbereich, der für die Untersuchung der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese besonders relevant war, eine Auswertung durch den relativ hohen Standardfehler schwer. Um sicherzustellen, dass diese Abweichungen nicht durch eine Strategie der Versuchspersonen während des Experimentalablaufs entstanden sind, wurde ein zweites Experiment durchgeführt, in dem die vier Kongruenzbedingungen in geblockter Anordnung präsentiert wurden.

3. Experiment 2: Geblockte kongruente vs. inkongruente Durchgänge

Die Daten des ersten Experimentes lieferten Evidenz gegen die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese und unterstützten in vielerlei Hinsicht die Vorhersagen des Zählermodells. Dennoch ist es möglich, dass die Ergebnisse von Experiment 1 von anderen Effekten gekennzeichnet sind. Offensichtlich fiel es den Versuchspersonen leichter, ein visuelles Standardintervall mit einem auditiven Vergleichsintervall zu vergleichen als umgekehrt. Möglicherweise orientierten sich die Versuchspersonen mehr an der sensorischen Information des Vergleichs- als an der des Standardintervalls. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass stets eine Ungewissheit bezüglich der Modalität beider Intervalle bestand, da die sensorische Modalität des Standard- und des Vergleichsintervalls von einem Durchgang zum anderen in randomisierter Folge wechselte. Dadurch hatten die Versuchspersonen eventuell Schwierigkeiten damit, genügend Aufmerksamkeitsreserven für die Information der jeweils dargebotenen Modalität zur Verfügung zu stellen (siehe auch Ulrich et al., 2006a). Möglicherweise führte das dazu, dass die Versuchspersonen die sensorische Information des Standardintervalls ein Stück weit ignorierten und die Information des darauf folgenden Vergleichsintervalls überbewerteten. Diese Strategie würde dazu führen, dass die Werte für DL bei einem auditiven Vergleichsintervall niedriger ausfallen als die bei einem visuellen, denn das auditive System verfügt über eine bessere Auflösung als das visuelle (Goodfellow, 1934). Dass randomisierte im Gegensatz zu geblockten Durchgängen zu erhöhten Diskriminationswerten führen können, wurde bereits in der Literatur berichtet (Grondin & Rousseau, 1991; Grondin & Rammsayer, 2003; Penner, 1976). Da die

gefundenen Effekte besonders bei langen Zeitdauern zunehmen, sollte die alternative Erklärung auch bezüglich den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese überprüft werden. Denn diese Hypothese geht davon aus, dass zur Verarbeitung langer Zeitdauern kognitive Mechanismen eingesetzt werden, die ja auch Aufmerksamkeitsprozesse beinhalten. Insgesamt kann damit vorläufig nicht ausgeschlossen werden, dass die Versuchspersonen möglicherweise eine Strategie anwendeten. Obgleich sich die Befunde in Einklang mit den Vorhersagen des Zählermodells befinden, soll die alternative Erklärung doch überprüft werden.

Mit Experiment 2 sollte die Frage untersucht werden, ob die Ergebnisse aus Experiment 1 nicht strategische Effekte widerspiegeln, die durch die Aufgabenunsicherheit bei randomisierter Darstellung hervorgerufen wurden. Daher wurde in Experiment 2 diese Aufgabenunsicherheit reduziert, um die Vorhersagen des ersten Experimentes unter vereinfachenden Bedingungen zu überprüfen. Die Vorhersagen der beiden Hypothesen ändern sich durch den veränderten Experimentalablauf nicht: Bezüglich der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese sollte sich der sensorische Einfluss auf kurze Zeitdauern replizieren lassen. Der sensorische Einfluss auf lange Zeitdauern sollte jedoch verschwinden, da diese abstrakt repräsentiert werden. Wenn hingegen das Zählermodell gültig ist, sollten sich die Befunde des ersten Experimentes replizieren lassen, wonach kurze und lange Zeitdauern gleichartig repräsentiert werden und eine Wechselwirkung zwischen Kongruenz und Modalität des Standardintervalls besteht.

3.1 Methode

Versuchspersonen. Eine andere Stichprobe von 20 erwachsenen Versuchspersonen, davon 15 weibliche und 5 männliche, nahmen an diesem Experiment teil. Die jüngste Versuchsperson war 19, die älteste 39 Jahre alt ($M = 24.9$, $SD = 5.5$). Alle Versuchspersonen verfügten über normale visuelle und auditive Fähigkeiten. Es handelte sich um Studenten der Universität Tübingen. Für ihre Versuchsteilnahme wurden sie wahlweise mit 7.50 € bezahlt oder sie erhielten eine Bescheinigung über je eine abgeleistete Versuchspersonenstunde.

Apparate, Design und Reize. Alles war identisch mit Experiment 1.

Ablauf. Das zweite Experiment war vollkommen identisch mit dem ersten, lediglich der Aufbau der einzelnen Blöcke wurde geändert. Während im ersten Experiment in jedem Block alle vier Kongruenzbedingungen in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden, bestand nun jeder Block nur noch aus einer Kongruenzbedingung. In jedem Block wurde nur eine der vier Kongruenzbedingungen (auditiv - auditiv, visuell - visuell, auditiv - visuell, visuell - auditiv) präsentiert. Die Reihenfolge der Blöcke bezüglich der Kongruenzbedingungen wurde über die Versuchspersonen nach der Methode des balancierten Lateinischen Quadrats ausbalanciert. Die Anzahl der Trainingsdurchgänge blieb analog zum ersten Experiment. Insgesamt gab es acht Blöcke, wobei die Standarddauer (100 und 1000 ms) wie bei Experiment 1 nach den ersten vier Blöcken wechselte. Die Anzahl der Durchgänge pro Block wurde auf 60 festgelegt, um die statistische Power im Vergleich zum ersten Experiment zu erhöhen. Damit ergaben sich zusammen 480 Experimentaldurchgänge.

3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse von Experiment 2 sind in Abbildung 9 als Funktion der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls dargestellt. Vergleicht man die Abbildungen 8 und 9, so fällt auf, dass die Ergebnismuster des zweiten Experimentes denen des ersten ähnlich sind. Zunächst konnte der sensorische Einfluss auf kurze und lange Zeitdauern repliziert werden, er scheint erneut bei langen Zeitdauern ausgeprägter als bei kurzen ausgefallen zu sein. Ebenso bestätigte sich, dass die Reihenfolge, in der die Modalitäten dargeboten wurden, offensichtlich die Werte von DL und CE beeinflussen. Die geblockte Darbietungsform scheint zu einer tendenziellen Verbesserung der Genauigkeit geführt zu haben. Besonders auffällig zeigt sich das in Abbildung 9 bezüglich DL für lange kongruente Durchgänge und bezüglich CE für lange inkongruente. Das spricht dafür, dass diese Aufgabenstellung den Versuchspersonen leichter fiel. Da sich kein anderes Ergebnismuster ergab, sprechen die Ergebnisse dagegen, dass die Versuchspersonen im ersten Experiment eine Strategie anwendeten.

Die Auswertung erfolgte analog zu der des ersten Experimentes mit einer dreifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung über die Faktoren Standarddauer, Kongruenz und Modalität des Standardintervalls.

Unterschiedsschwelle DL. Wie im ersten Experiment lagen die durchschnittlichen Werte für DL bei kurzen Standarddauern deutlich unter der langen, $F(1,19) = 121.1, p < .001$ (16 vs. 101 ms). Die Diskriminationsleistung war in kongruenten Durchgängen eindeutig besser als in inkongruenten, $F(1,19) = 36.3, p < .001$ (49 vs. 68 ms). Der Kongruenzeffekt nahm mit der Standarddauer sogar deutlich zu $F(1,19) = 21.1, p < .001$.

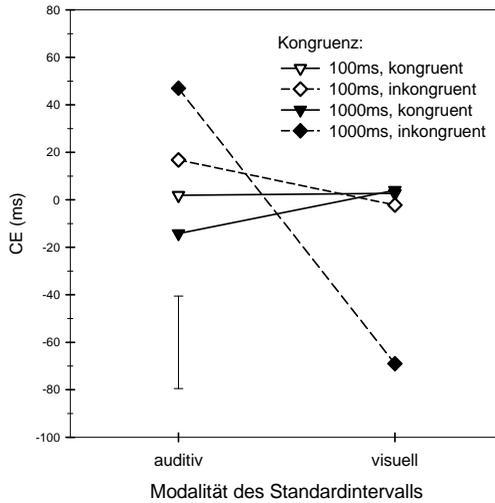
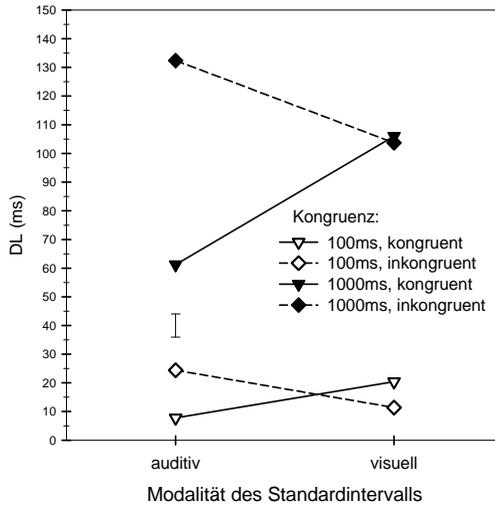


Abbildung 9: Ergebnisse von Experiment 2: DL und CE als Funktion der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Standardintervalls.

Dies Ergebnis repliziert die starke Evidenz gegen die Gültigkeit der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Im Einklang mit den Annahmen des Zählermodells und dem ersten Experiment wurde der Kongruenzeffekt durch die Modalität des Standardintervalls beeinflusst, $F(1,19) = 25.4, p < .001$. Letztendlich wurde die dreifache Interaktion aller Faktoren erneut signifikant, wobei die Interaktion zwischen Kongruenz und Modalität bei langen Standarddauern deutlicher wurde als bei kurzen $F(1,19) = 7.2, p = .015$. Dies spricht eindeutig gegen die Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Erneut ergab sich kein Haupteffekt der Modalität des Standardintervalls und auch kein Interaktionseffekt derselben mit der Standarddauer, $F < 1$. Wertet man mit einer ANOVA über die Faktoren Standarddauer, Modalität des Standardintervalls und Modalität des Vergleichsintervalls aus, so zeigte sich analog der Einfluss der Modalität des Vergleichsintervalls mit $F(1,19) = 25.4, p < .001$, der mit der Standarddauer zunahm, $F(1,19) = 7.2, p = .015$. Damit konnte der Einfluss der Modalität des Vergleichsintervalls, der sich im ersten Experiment gezeigt hatte, repliziert werden.

Konstanter Fehler CE. Das Ergebnismuster des zweiten Experimentes entspricht dem des ersten, allerdings wurden keine signifikanten Effekte erzielt. Lediglich die Interaktion zwischen Modalität des Standardintervalls und Kongruenz ergab eine Tendenz mit $F(1,19) = 3.1, p = .096$. Anscheinend führte die geblockte Darstellung zu einer Abnahme des konstanten Fehlers. Dieser Effekt wurde bereits von Penney et al., (2000) berichtet. Die Autoren fanden, dass auditive und visuelle Intervalle nur dann als unterschiedlich lang wahrgenommen wurden, wenn beide Modalitäten innerhalb eines Blockes verwendet wurden. Sobald die beiden Modalitäten in getrenn-

ten Blöcken präsentiert wurden, wurden sie gleich lang wahrgenommen. Dieser Effekt wurde möglicherweise durch die geblockte Darbietungsform produziert. Interessanterweise glichen sich die Werte nur bezüglich CE an, nicht jedoch bezüglich DL. Das spricht dafür, dass die wahrgenommene Länge nicht mit der Genauigkeit zusammenhängt und es daher wichtig ist, beide Maße zugleich zu erheben.

3.3 Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen eindeutig die des ersten Experiments und die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells. Der bimodale sensorische Einfluss scheint entgegen den Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese bei langen Zeitdauern nicht ab- sondern eher zuzunehmen. Weiterhin wird die Genauigkeit der Zeitwahrnehmung durch die Kongruenz in Abhängigkeit von der Modalität des Standardintervalls beeinflusst. Damit kann die Überlegung, ob die Ergebnisse von Experiment 1 durch die Aufgabenunsicherheit und Strategien der Versuchspersonen zustande kamen, zurückgewiesen werden.

Interessant ist auch, dass sich die Vorhersage des neuronalen Zählermodells bestätigte, indem die Modalität des Vergleichsintervalls und nicht die des Standardintervalls die Genauigkeit der Zeitwahrnehmung beeinflusst. Eine Erklärung könnte darin liegen, dass auditive und visuelle Signale unterschiedlich effizient verarbeitet werden. So geht Posner (1978) davon aus, dass interne Codes automatisch vom Eingangssignal aktiviert werden, womit er meint, dass diese Prozesse unabhängig von Absicht oder Aufmerksamkeit der Versuchspersonen ablaufen. Er kommt aufgrund zahl-

reicher Untersuchungen, die auditive mit visuellen Signalen vergleichen, zu dem Schluss, dass die auditive Modalität viel unmittelbarer verarbeitet wird als die visuelle. Dem zufolge fällt es viel leichter, die Aufmerksamkeit von einem visuellen auf einen auditiven Reiz zu lenken als umgekehrt (Posner, 1978). Das könnte erklären, warum die Abfolge visuell - auditiv genauer diskriminiert wurde als vice versa. Allerdings wurde bisher nur die Abfolge der Modalitäten in einem Durchgang berücksichtigt, jedoch die Position des Standard- und des Vergleichsintervalls in einem Versuchsablauf nicht beachtet. In beiden Experimenten wurde das zeitlich konstante Standardintervall vor dem zeitlich variablen Vergleichsintervall dargeboten. Da bisher in allen Durchgängen der beiden Experimente das Vergleichsintervall an zweiter Stelle dargeboten wurde, ist vorläufig unklar, ob ausschließlich die sensorische Information des zweiten Intervalls einer Folge stärker gewichtet wurde oder ob diesem Intervall mehr Aufmerksamkeit zuteil wurde, weil es zeitlich variabel ist. In einem weiteren Experiment sollen die beiden Effekte voneinander getrennt untersucht werden. Besonders interessiert dabei, inwieweit das neuronale Zählermodell in der Lage ist, die Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall in seinen Vorhersagen zu berücksichtigen.

4. Experiment 3: Abfolge Vergleichs- vor Standardintervall

Die beiden vorherigen Experimente fanden einen klaren Reihenfolgeeffekt, der insbesondere bei den inkongruenten Durchgängen deutlich wurde. Offensichtlich hat die Modalitätenfolge visuell - auditiv einen deutlichen Vorteil bezüglich der Genauigkeit gegenüber der Folge auditiv - visuell. Dieser Effekt wurde vom Zählermodell im Unterschied zur sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese vorhergesagt. Der Reihenfolgeeffekt wurde in der Einleitung damit erklärt, dass das erste Intervall mit der durch die Pulsdichte bedingten Auflösung des zweiten Intervalls verglichen wird. Mit einer höheren Pulsrate und Auflösung des zweiten Intervalls sollte das erste Intervall genauer wahrgenommen werden können als mit einer niedrigeren Auflösung und Pulsrate des zweiten. In der Literatur wurde mit unterschiedlichen Methoden beobachtet, dass die Abfolge der Modalitäten bei der Darbietung die Genauigkeit beeinflusst. Wearden et al. (1998) fanden mit der Single Stimulus Methode, dass gefüllte auditive Intervalle nach einem visuellen Standardintervall genauer beurteilt werden als vice versa. Das ist interessant, weil die Autoren das Standardintervall vor den Vergleichsintervallen darboten und daher die Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall nicht so ins Gewicht fallen sollte wie in der vorliegenden Arbeit. Grondin et al. (2005) fanden bei der Untersuchung leerer Intervalle, dass die Markerfolge visuell - auditiv zu einer geringeren Variabilität führt als auditiv - visuell (siehe auch Grondin, Irvy, Franz, Perreault & Metthé, 1996; Rousseau, Poirier & Lemyre, 1983). Damit liegen einige Hinweise aus der Literatur für den Einfluss der Modalitätenfolge unabhängig von der Position des Standard- und Vergleichsintervalls vor.

Allerdings wurden in der vorliegenden Arbeit bisher die zeitlichen Einflüsse, die sich durch die Reihenfolge von Standard- und Vergleichsintervall ergeben könnten, vernachlässigt. In den Experimenten wurde in allen Durchgängen die Intervallfolge Standardintervall vor Vergleichsintervall ($S_1 - V_2$) verwendet. Nun ist es ja auch möglich, dass die Versuchspersonen ihre Aufmerksamkeit stärker auf das zeitlich variable Vergleichsintervall richteten und dadurch diese Information höher bewerteten. Mit anderen Worten bedeutet das, dass die Intervallabfolge $S_1 - V_2$ das Gesamturteil mit beeinflusst. Meist wird davon ausgegangen, dass Ergebnisse von Aufgabenstellungen mit $S_1 - V_2$ identisch oder zumindest vergleichbar mit denen der Folge Vergleichsintervall vor Standardintervall ($V_1 - S_2$) sind. Daher werden in vielen Arbeiten die Abfolgen $S_1 - V_2$ und $V_1 - S_2$ randomisiert dargeboten, um Unterschiede auszubalancieren. Jedoch existieren in der Literatur auch Auffassungen, denen zufolge die Reihenfolge von Standard- und Vergleichsintervall die Ergebnisse deutlich beeinflusst. Bereits Michels und Helson (1954) überprüften anhand von Untersuchungen zur Gewichtswahrnehmung die Hypothese, wonach die Abfolge $S_1 - V_2$ vs. $V_1 - S_2$ Urteile von Diskriminationsaufgaben beeinflusst. Wenn das Vergleichsgewicht vor dem Standardgewicht verwendet wurde, fiel es den Versuchspersonen deutlich schwerer, Unterschiede festzustellen, als bei der umgekehrten Reihenfolge. In neuerer Zeit wurde dieser Ansatz aufgegriffen (Hellström, 2000) und bezüglich der Zeitwahrnehmung untersucht (Hellström, 2003; Hellström & Rammsayer, 2004). Die Autoren fanden, dass bei der Zeitwahrnehmung das an zweiter Position dargebotene Intervall die Wahrnehmung deutlicher beeinflusst als das erste. In einem anderen Ansatz, der die Variabilität zweier aufeinander folgender Signale auf die Zeitwahrnehmung

untersuchte, wurde mit Markern von leeren Intervallen experimentiert. So fand bereits Penner (1976), dass zeitliche Variationen besonders des ersten Markers die Zeitwahrnehmung beeinträchtigen. Grondin et al. (2005) griffen diese Überlegungen auf und konnten die Ergebnisse replizieren.

Damit liegen Befunde für beide Möglichkeiten vor, indem einerseits die Reihenfolge der Modalitäten und andererseits die Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall die Genauigkeit beeinflussen. Um diese Effekte getrennt zu untersuchen, wurde im folgenden Experiment die Reihenfolge von $S_1 - V_2$ in $V_1 - S_2$ umgedreht. Für diese Arbeit ist nun interessant, ob und inwiefern die beiden Hypothesen die Reihenfolge $V_1 - S_2$ in ihren Vorhersagen berücksichtigen können.

Die in dieser Arbeit untersuchten Hypothesen machen unterschiedliche Vorhersagen für den Fall $S_1 - V_2$ vs. $V_1 - S_2$. Die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese berücksichtigt die Reihenfolge $S_1 - V_2$ vs. $V_1 - S_2$ ebenso wenig wie die Reihenfolge der Modalitäten bei der Reizpräsentation. Damit bleiben ihre Vorhersagen gleich (siehe Abbildung 4). Dagegen lassen sich aus den Gleichungen des generalisierten Zählermodells Vorhersagen ableiten, die die Umkehr der Intervallfolge berücksichtigen. Analog zu Gleichungen (4) gilt nun (siehe auch Ulrich et al., 2006a):

$$P\{''S > C'' \mid t_s, t_c\} = \Phi \left[\frac{0 - E[D(t_s, t_c)]}{\sqrt{\text{Var}[D(t_s, t_c)]}} \right] = \Phi \left[\frac{\frac{t_s}{\mu_s} - \frac{t_c}{\mu_c}}{\sqrt{\frac{t_s \cdot \sigma_s^2}{\mu_s^3} + \frac{t_c \cdot \sigma_c^2}{\mu_c^3}}} \right] \quad (9)$$

Die Vorhersagen sind in Abbildung 10 dargestellt, die oben die Unterschiedsschwelle DL sowie unten den konstanten Fehler CE als Funktion der

Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Vergleichsintervalls zeigt. Dabei wurden dieselben Parameter verwendet wie in Experiment 1.⁴ Das Zählermodell macht bezüglich DL die Vorhersage, dass sich bei der Darbietungsfolge $V_1 - S_2$, bei der das Vergleichsintervall vor dem Standardintervall dargeboten wird, ein umgekehrter Reihenfolgeeffekt ergibt: Nun sollte auditiv - visuell genauer als visuell - auditiv diskriminiert werden. Außerdem legt Abbildung 10 einen Haupteffekt der Modalität des Vergleichsintervalls an erster Position V_1 nahe. Demnach postuliert das neuronale Zählermodell, dass die Genauigkeit entscheidend durch die Reihenfolge von Standard- und Vergleichsintervall beeinflusst wird. Denn wenn nur die Abfolge der Modalitäten einen maßgeblichen Einfluss auf DL haben sollte, hätte das Muster dieser Vorhersage dem von Experiment 1 (Abbildung 6) gleichen müssen. Dies ist jedoch insbesondere durch die Umkehr der Kurve für inkongruente Durchgänge nicht der Fall. Möglicherweise wirkt sich eine zeitliche Variation eines visuellen Vergleichsintervalls V_1 , das ja schon durch die geringere Pulsrate verhältnismäßig ungenau repräsentiert wird, zusätzlich negativ auf die Diskriminationsleistung aus. Die Information eines auditiven Intervalls wird dann weniger durch zeitliche Variationen beeinträchtigt, da auditive Intervalle bereits durch die höhere Pulsdichte repräsentiert werden und somit über eine höhere Auflösung verfügen. Dagegen bleiben die anderen Effekte gleich.

⁴ Modifikationen der Parameter für die Simulation ergeben wieder keine Änderung der Effekte, sondern variieren bei DL die Verhältnisse von den kongruenten und den inkongruenten Durchgängen, wobei die Interaktion bleibt. Wenn die Differenz visuell - visuell zu auditiv - auditiv geringer wird, nimmt sie zwischen auditiv - visuell und visuell - auditiv zu. Bezüglich CE ändern sich lediglich die absoluten Werte.

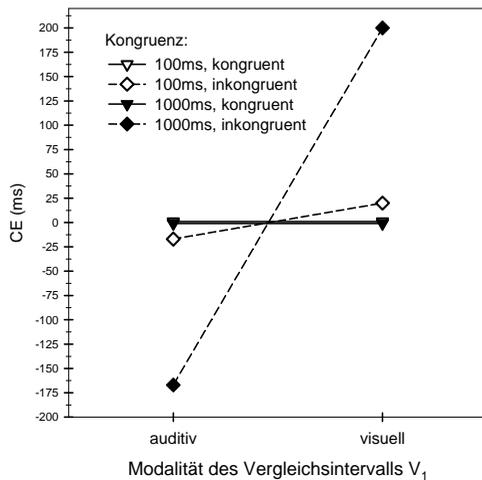
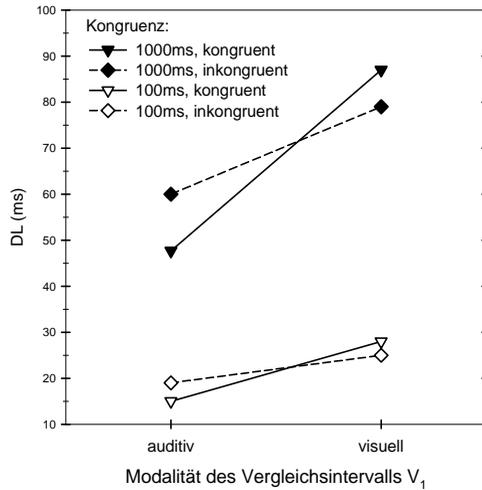


Abbildung 10: Vorhersagen des Zählermodells zu Experiment 3 für DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Vergleichsintervalls V_1 .

Bei kongruenten Durchgängen sollten erwartungsgemäß weiterhin auditive Intervalle genauer diskriminiert werden als visuelle. Dieses Muster tritt wieder bei kurzen und langen Zeitdauern gleichartig auf. Das Ergebnismuster spricht tendenziell gegen einen Kongruenzeffekt. Möglicherweise ergibt sich eine Wechselwirkung zwischen Kongruenz und Modalität des V_1 , was sich jedoch aus der Abbildung nicht eindeutig vorhersagen lässt.

Bezüglich CE ergibt sich das gleiche Muster wie bei den Vorhersagen zu Experiment 1, nur dass sich etwas analog zu DL bei inkongruenten Durchgängen ebenfalls die Reihenfolge umdreht: Ein visuelles Intervall an erster Position eines Durchgangs, d. h. als V_1 , soll nun länger wahrgenommen werden als das darauf folgende auditive Intervall als S_2 ; ein auditives V_1 entsprechend kürzer als ein visuelles S_2 . Diese Vorhersagen des Zählermodells sind schwer zu erklären. Jedoch weisen bereits Michels und Helson (1954) darauf hin, dass sich die Werte für den Time order error (TOE), der ja ein anderes Maß für den CE darstellt, vom positiven Bereich in den negativen und umgekehrt drehen, sobald die Reihenfolge $S_1 - V_2$ in $V_1 - S_2$ geändert wird (s. a. Hellström & Rammsayer, 2004).

Obleich die Ergebnisse der Experimente 1 und 2 deutlich gegen die Gültigkeit der sensorisch - kognitive Kodierungshypothese sprechen, sollen die Experimente weiter mit beiden Standarddauern durchgeführt werden, da die Frage, ob nicht doch unterschiedliche Mechanismen zur Zeitverarbeitung vorliegen, in neueren Arbeiten, die thematische Bezüge zur vorliegenden Arbeit aufweisen, immer wieder aufgeworfen wird (z. B. Grondin et al., 2005; Hellström & Rammsayer, 2004; Rammsayer & Ulrich, 2005).

4.1 Methode

Versuchspersonen. Eine andere Stichprobe von 20 erwachsenen Versuchspersonen, davon 17 weibliche und 3 männliche, nahmen an diesem Experiment teil. Die jüngste war 19, die älteste 33 Jahre alt ($M = 24.1$, $SD = 4.6$). Alle Versuchspersonen verfügten über normale visuelle und auditive Fähigkeiten und nahmen unter den gleichen Bedingungen wie in den ersten Experimenten an der Studie teil.

Apparate, Design und Reize. Alles war identisch mit Experiment 2. Der einzige Unterschied bestand darin, dass nun das Vergleichsintervall vor dem Standardintervall präsentiert wurde, also in der Reihenfolge $V_1 - S_2$.

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse von Experiment 3 sind in Abbildung 11 dargestellt. Sie zeigt oben die Unterschiedsschwelle DL sowie unten den konstanten Fehler CE als Funktion der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Vergleichsintervalls. Zunächst fällt auf, dass sich erneut ein gleichartiges Muster für lange und kurze Zeitdauern ergibt. Entgegen den Vorhersagen des neuronalen Zählermodells stellte sich für beide Zeitdauern ein deutlicher Kongruenzeffekt ein. Außerdem ist auffällig, dass die Beurteilungen insgesamt erheblich ungenauer ausfallen; für DL wie für CE verdoppeln sich die Werte ungefähr. Dies war von keiner Hypothese vorausgesagt worden. Wie in den vorangegangenen Auswertungen wurde über die Faktoren Standarddauer, Kongruenz und Modalität des Vergleichsintervalls V_1 eine ANOVA mit Messwiederholung gerechnet.

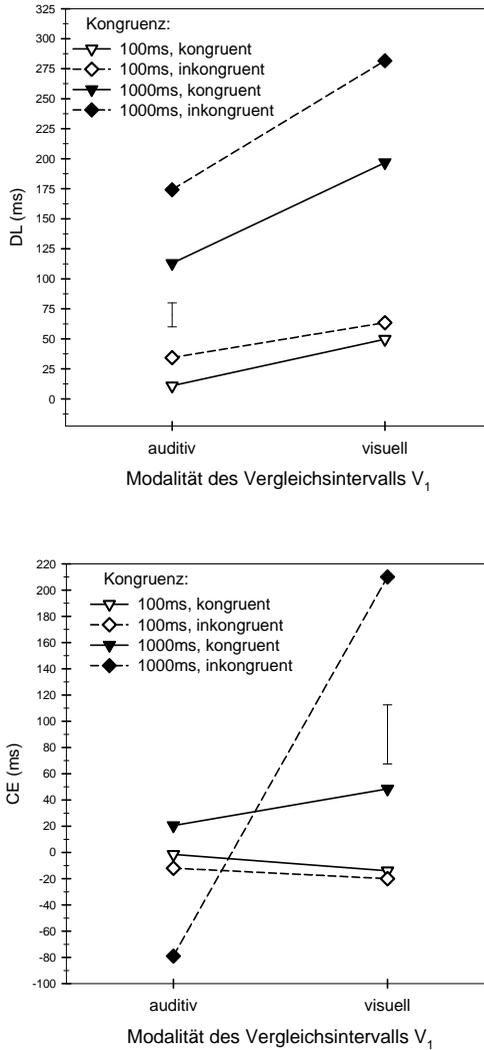


Abbildung 11: Ergebnisse von Experiment 3 für DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer, der Kongruenz und der Modalität des Vergleichsintervalls V_1 .

Unterschiedsschwelle DL. Wie in den ersten beiden Experimenten lagen die durchschnittlichen Werte für DL bei kurzen Standarddauern deutlich unter denen der langen, $F(1,19) = 69.0, p < .001$ (40 vs. 191 ms). Der deutliche Kongruenzeffekt, dem zufolge kongruente Durchgänge deutlich besser diskriminiert wurden als inkongruente, konnte statistisch bestätigt werden, $F(1,19) = 18.2, p < .001$ (93 vs. 138 ms). Der Kongruenzeffekt entspricht erneut den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese nur teilweise, da er zwar bei kurzen auftritt, aber bei langen Standarddauern sogar zunimmt, $F(1,19) = 8.4, p < .009$. Wie vom neuronalen Zählermodell vorhergesagt, ergaben sich genauere Diskriminationswerte, wenn das Intervall V_1 auditiv und nicht visuell war, $F(1,19) = 42.1, p < .001$ (148 vs. 83 ms). Damit ergaben sich Hinweise dafür, dass die Position des Vergleichsintervalls die wahrgenommene Genauigkeit entscheidend mit beeinflusst. Der Effekt trat bei kongruenten und inkongruenten Durchgängen gleichermaßen auf, $F < 1$. Entgegen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese wurden bei langen Standarddauern Durchgänge mit auditivem im Vergleich zu visuellem V_1 genauer diskriminiert, $F(1,19) = 15.1, p < .001$. Es ergaben sich keine Interaktionen aller drei Faktoren, $F < 1$. Generell ist auffällig, dass die Werte für DL insgesamt auf einem wesentlich höheren Niveau liegen als in den ersten beiden Experimenten, der Mittelwert über DL betrug im zweiten Experiment 58 ms, dagegen 115 ms in Experiment 3, $t = 5.1, df = 24.6, p < .001$, zweiseitiger t-Test, korrigiert für ungleiche Varianzen. Dieser Effekt war vom Zählermodell nicht vorhergesagt worden.

Konstanter Fehler CE. Bei kurzen Standarddauern ergaben sich wie in den Experimenten 1 und 2 deutlich niedrigere Werte für CE als bei lan-

gen, $F(1,19) = 89.6$, $p = .006$. Theoretisch bedeutsam ist hier, dass die Versuchspersonen V_1 unterschätzten, wenn er visuell war, $F(1,19) = 7.9$, $p = .011$. Damit wird die Vorhersage des Zählermodells bestätigt, indem die Wechsel der Reihenfolge in $V_1 - S_2$ eine Umkehr der Werte für CE zur Folge hat. Dieser Effekt nahm bei langen Standarddauern noch zu, $F(1,19) = 14.1$, $p = .001$, und trat erwartungsgemäß bei inkongruenten Durchgängen deutlich stärker auf, $F(1,19) = 7.1$, $p = .015$. Anders als in Experiment 1 erreichte die Interaktion zwischen Kongruenz und Standarddauer keine statistische Signifikanz; sie wurde jedoch von der Modalität des V_1 beeinflusst, was die dreifache Interaktion zeigt, $F(1,19) = 8.1$, $p = .010$.

4.3 Diskussion

In diesem Experiment wurde das Vergleichsintervall vor dem Standardintervall in der Abfolge $V_1 - S_2$ dargeboten. Dabei sollte der in den ersten beiden Experimenten gefundene Reihenfolgeeffekt der inkongruenten Durchgänge, dem zufolge die Diskriminationsleistungen für Durchgänge der Abfolge visuell - auditiv besser sein sollten als für auditiv - visuell, genauer untersucht werden. Es ging dabei um die Frage, ob die Modalität des Intervalls an zweiter Position (als S_2 oder V_2) oder die Modalität des Vergleichsintervalls (als V_1 oder V_2) das Ergebnis derart deutlich beeinflusst. Das neuronale Zählermodell sagte einen deutlichen Effekt der Modalität von V_1 vorher. Das bedeutet, dass die Genauigkeit des Gesamturteils zumindest nicht nur durch die Abfolge der Modalitäten innerhalb der Durchgänge (auditiv - visuell bzw. visuell - auditiv), sondern auch durch die Position des Vergleichsintervalls (V_1 vs. V_2) bestimmt wird. Das sollte sich

zeigen, indem sich bei der Abfolge $V_1 - S_2$ bei inkongruenten Durchgängen die Werte von DL sowie von CE im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Experimenten mit der Abfolge $S_1 - V_2$ umkehren sollten. Diese Vorhersagen konnten bestätigt werden. Schwierig zu erklären sind vorläufig zwei Effekte. Zum einen ergab sich entgegen den Vorhersagen ein deutlicher Kongruenzeffekt, der bei kurzen und langen Zeitdauern gleichermaßen auftrat. Zweitens verdoppelten sich die absoluten Werte von CE und DL nahezu.

Eine mögliche Erklärung für die Abnahme der Genauigkeit liefert das Entrainment Modell (Barnes & Jones, 2000; Large & Jones, 1999). Es beinhaltet, dass das Urteil einer Diskriminationsaufgabe durch die Rhythmik der gesamten Sequenz, die aus "Vorperiode F_p – Intervall 1 – Interstimulusintervall ISI – Intervall 2" besteht, beeinflusst wird. Vereinfacht gesagt bedeutet das für die vorliegenden Experimente, dass ein Urteil umso genauer ausfällt, je rhythmischer oder einheitlicher die Zeitdauern präsentiert werden. Da in den vorliegenden Experimenten F_p und ISI immer konstant bei 1000 ms gehalten wurden, sollte dann $V_1 - S_2$ eine deutliche Abnahme der Genauigkeit im Vergleich zu $S_1 - V_2$ bewirken.

In der Literatur existieren auch noch andere Befunde, denen zufolge die Präsentationsfolge $V_1 - S_2$ zu vergleichsweise schlechteren Diskriminationswerten führt (Hellström & Rammsayer, 2004; Michels & Helson, 1954). Die Autoren erklären ihre Ergebnisse damit, dass der zweite Intervall nicht direkt mit dem ersten, sondern mit einem aus allen vorangegangenen Durchgängen gemitteltem Wert verglichen wird, den Michels und Helson (1954) als "comparative adaption level" bezeichneten. Wenn das erste Intervall zeitlich variiert, fällt es den Versuchspersonen offensichtlich schwe-

rer, eine stabile Repräsentation zu bilden (s.a. Grondin & Rammsayer, 2003). Auch neuere Arbeiten bestätigen für verschiedene visuelle Reize, dass die Abfolge $V_1 - S_2$ generell schlechter diskriminiert wird als $S_1 - V_2$ (z. B. Morgan, Watamaniuk & McKee, 2000; Nachmias, 2006). Dabei wird angenommen, dass aus mehreren vorangegangenen Reizen eine interne Repräsentation des Standardintervalls gebildet wird. Die generelle Abnahme der Genauigkeit könnte auch den deutlichen Kongruenzeffekt bewirkt haben. Die zitierten Arbeiten, die sich mit der Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall beschäftigten, verwendeten ausschließlich kongruente Durchgänge. Es scheint jedoch plausibel, dass sich ein Modalitätenwechsel bei einer generell höheren Streuung der internen Repräsentationen vergleichsweise stärker auswirkt.

Zusammenfassung. In diesem Experiment konnte der Teil der Vorhersage des Zählermodells, wonach außer der Modalität auch die Position des Vergleichsintervalls die Wahrnehmungsleistung massiv beeinflusst, bestätigt werden. Denn das neuronale Zählermodell war in der Lage, die kontraintuitive Umkehr der Werte für DL und CE bei inkongruenten Durchgängen sowie den Effekt der Modalität von V_1 bezüglich DL vorherzusagen. Damit ermöglichten seine Vorhersagen, zwischen der Abfolge der Modalitäten und der des Standard- und Vergleichsintervalles zu diskriminieren. Allerdings konnte das Zählermodell nicht den Kongruenzeffekt vorhersagen.

Die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese ließen sich auch im dritten Experiment nicht bestätigen. Allerdings hatte diese Hypothese, wenn auch nur für kurze Zeitdauern, einen Kongruenzeffekt vorhergesagt. Offensichtlich fiel es den Versuchspersonen unter der

Bedingung $V_1 - S_2$ erheblich schwerer, inkongruente Durchgänge im Vergleich zu kongruenten zu diskriminieren. Möglicherweise profitierten die Mechanismen zur Zeitverarbeitung ganz besonders bei der Abfolge $V_1 - S_2$ davon, wenn in beiden Intervallen dieselbe sensorische Information vorliegt. Dies soll in den folgenden Experimenten weiter untersucht werden, wobei jeweils die Vorhersagen der beiden Hypothesen dieser Arbeit abgeleitet und überprüft werden sollen.

5. Experiment 4: Bimodales Standard- und unimodales Vergleichsintervall

Die vorangegangenen Experimente ergaben Evidenz für das Zählermodell. Besonders beachtenswert ist dabei, dass dieses Modell geeignet ist, theoretisch begründete quantitative Vorhersagen zu machen, die die Reihenfolge bezüglich der Modalitäten und bezüglich des Standard- und Vergleichsintervalls betreffen. Ganz offensichtlich bietet das generalisierte und durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen formulierte Modell interessante Perspektiven, die es erlauben, nichtlineare Vorgänge bei der Zeitwahrnehmung zu beschreiben. Jedoch ergaben sich auch Effekte, die in dieser Ausprägung vom Zählermodell nicht vorhergesagt worden waren. So zeigte sich in allen Experimenten ein Kongruenzeffekt, dem zufolge inkongruente Durchgänge ungenauer diskriminiert wurden als kongruente und der außerdem mit zunehmender Standarddauer deutlicher wurde. Beide Ergebnisse lassen sich nicht durch die Vorhersagen des generalisierten Zählermodells erklären. Die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese erklären nur den Kongruenzeffekt in Bezug auf die kurzen Zeitdauern.

Möglicherweise ist die Beurteilung inkongruenter Durchgänge im Vergleich zu kongruenten deutlich erschwert. Bei den bisherigen Experimenten hatte sich ergeben, dass kongruente Durchgänge immer gleichartig verarbeitet wurden, d. h. unabhängig von allen Manipulationen wurden auditive Durchgänge stets genauer als visuelle diskriminiert. Die Diskriminationsleistung inkongruenter Durchgänge wurde jedoch durch die Manipulationen stark beeinflusst. Besonders auffällig war dies bei der Umkehr von Standard- und Vergleichsintervall. Möglicherweise beansprucht der Modalitätenwechsel bei inkongruenten Durchgängen im Vergleich zu kongruenten

so viel Aufmerksamkeit, dass die Zeitverarbeitung darunter leidet. Einen möglichen Erklärungsansatz liefert das Attentional - Gate Modell von Zaky und Block (1997). Ihm zufolge ist zwischen Pulsgenerator und Zähler ein Gate geschaltet, das in Abhängigkeit von der verfügbaren Aufmerksamkeit gesteuert wird. Je mehr Aufmerksamkeit für die Zeitverarbeitung zur Verfügung steht, desto weiter öffnet sich das Gate, und desto mehr Pulse gelangen vom Generator zum Zähler. Damit wird ein Zeitintervall länger und genauer wahrgenommen. Wird dagegen wenig Aufmerksamkeit für die Zeitverarbeitung zur Verfügung gestellt, so gelangen weniger Pulse zum Zähler und dadurch wird die Zeitdauer kürzer und ungenauer wahrgenommen. Möglicherweise bewirkte der Modalitätenwechsel in den vorangegangenen Experimenten, dass ein großer Teil der Aufmerksamkeit nicht für die Zeitwahrnehmung zur Verfügung stand. Wenn der Modalitätenwechsel einen Aufmerksamkeitsverlust hervorruft, sollte dieser verschwinden, sobald in beiden Intervallen eines Durchgangs dieselbe sensorische Information verfügbar ist. Dies lässt sich erreichen, indem mindestens eines der beiden Intervalle bimodal dargeboten wird. Um diese Überlegungen zu überprüfen, soll ein Experiment mit bimodalen, d. h. simultan auditiv und visuell dargebotenen, Standardintervallen durchgeführt werden. Das darauf folgende Vergleichsintervall wird unimodal dargeboten, d. h. auditiv oder visuell. Da im Standardintervall die Information beider Modalitäten enthalten ist, sollte für das Vergleichsintervall kein modalitätenbedingter Aufmerksamkeitsverlust auftreten, der die Zeitwahrnehmung nach dem Attentional - Gate Modell beeinflusst. Damit sollte ein mögliches Ungleichgewicht der kongruenten und der inkongruenten Aufgabenstellungen verringert werden. Zwar macht das Attentional - Gate Modell keine konkrete Aussage

darüber, wie denn die bimodal vorliegende Information für die Zeitverarbeitung verwendet wird. Jedoch bietet die bimodale Darbietung in Hinblick auf beide Hypothesen dieser Arbeit interessante Aspekte, die im Folgenden genauer erläutert werden sollen.

Sensorisch-kognitive Kodierungshypothese. Folgt man der Argumentation der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese, der zufolge kurze Zeitdauern zunächst unabhängig voneinander in modalitätsspezifischen Codes repräsentiert werden, so ergibt sich für diese Zeitdauern ein Konflikt. Denn bei bimodaler Darbietung liegt die Zeitinformation nach Cowan (1988, 1997) in zwei Repräsentationen zugleich vor und wird zunächst unabhängig voneinander verarbeitet. Da die Information eines kurzen sensorischen Speichers nicht in einen anderen übertragen werden kann, liegt sie sozusagen doppelt vor und es kommt zu einem Wahrnehmungskonflikt. Folgt man dieser Argumentation, so kann zumindest bei kurzen Zeitdauern nur die Information einer Modalität für das Gesamturteil verwendet werden, entweder die auditive oder die visuelle. Auch in der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen, die sich mit der Frage beschäftigen, wie Informationen zur Wahrnehmung verarbeitet werden, die bimodal dargeboten werden. Für viele Wahrnehmungsleistungen scheint es eine dominante Modalität zu geben, die die entsprechende Information exakter repräsentieren kann. Einige Befunde sprechen dafür, dass ein Wahrnehmungskonflikt, der durch bimodale Informationen entsteht, so gelöst wird, dass die Information der weniger präzisen Modalität zugunsten der dominanten vernachlässigt wird (z. B. Welch, DuttonHurt & Warren, 1986). Wenn nun die Information für eine Wahrnehmungsleistung in zwei Modalitäten zugleich vorliegt, wird automatisch die Information der dominanten Modalität

zugrunde gelegt. Viele Befunde sprechen dafür, dass bei der Zeitwahrnehmung die auditive Modalität die genauere Information liefert und damit die dominante ist (z. B. zusammenfassend Grondin, 2001). In diesem Sinne ergab sich bei Untersuchungen mit bimodalen Intervallen bei der Zeitwahrnehmung, dass im Konfliktfall automatisch die Aufmerksamkeit auf die auditive Information gelenkt und diese verarbeitet wird, dagegen die simultan präsentierte visuelle Information vernachlässigt wird. Dies wird in der Literatur als "Modality Appropriateness Hypothese" (z. B. Wada, Kitagawa & Noguchi, 2003; Welch et al., 1986) oder als "Auditive Dominanz" bezeichnet (z. B. Walker & Scott, 1981).

Diese Annahme der Modality Appropriateness Hypothese deckt sich mit den Beschreibungen der kurzen sensorischen Speicher nach Cowan (1997), da in beiden Hypothesen nur eine der beiden sensorischen Informationen verarbeitet wird. Daraus folgt, dass gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese bei kurzen bimodalen Zeitdauern die visuelle Information zugunsten der auditiven vernachlässigt wird.

Daraus leiten sich die konkreten Vorhersagen der sensorisch-kognitive Kodierungshypothese für den Fall ab, dass das Standardintervall bimodal dargeboten wird. Falls daraus nur die Information der dominanten auditiven Modalität für die Zeitverarbeitung zugrunde gelegt wird, würde das für das Beispiel der Folge bimodal - visuell bedeuten, dass sie wie auditiv - visuelle Durchgänge diskriminiert werden sollten. Damit sollten sie laut den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese wie inkongruente auditiv - visuelle Durchgänge wahrgenommen werden. Dagegen sollten bimodal - auditive Durchgänge ähnlich genau wie kongruente auditiv - auditive diskriminiert werden. Diese Vorhersagen werden in Ab-

Abbildung 12 als Funktion der Standarddauer, der Modalität des Standardintervalls S_1 und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 dargestellt. Zur Verdeutlichung werden die Durchgänge mit bimodalem Standardintervall kongruenten und inkongruenten unimodalen gegenübergestellt. Die Verarbeitung langer Zeitdauern sollte, da sie mittels kognitiver Prozesse erfolgt, für kongruente, inkongruente und bimodale Durchgänge gleichartig erfolgen.

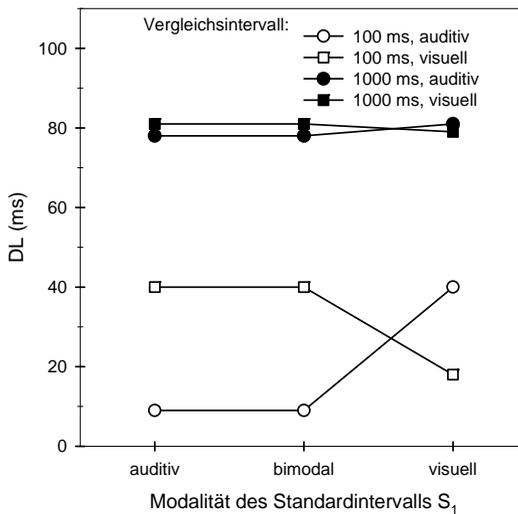


Abbildung 12: Vorhersage der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zu Experiment 4 für DL als Funktion der Standarddauer, der Modalität des Standardintervalls S_1 und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 .

Obleich die bisherigen Ergebnisse wenig Evidenz für die amodale Verarbeitung langer Zeitdauern ergaben, soll die Experimentalreihe doch

mit beiden Zeitdauern fortgesetzt werden. Denn es ist immerhin möglich, dass die Zunahme der Effekte bei langen Zeitdauern in den vorangegangenen Experimenten zumindest auch durch den Modalitätenwechsel und den damit verbundenen Aufmerksamkeitsverlust entstanden sind.

Generalisiertes Zählermodell. Das generalisierte Zählermodell ermöglicht es, die während eines Intervalls generierten Impulse über Wahrscheinlichkeitsverteilungen abzubilden. Konkret lässt sich das veranschaulichen, indem man annimmt, dass jede Modalität einen eigenen Zähler besitzt. Damit wäre es nahe liegend, dass bei einer simultanen Darbietung von einem Ton und einem gleichlangen visuellen Stimulus, die in jedem Kanal akkumulierten Impulse zu einer modalitätenunspezifischen Größe gemittelt werden. Eine solche gemittelte Größe besitzt eine mindestens ebenso große Reliabilität wie jede einzelne modalitätsspezifische Größe. Im Gegensatz zu den Überlegungen der Modality Appropriateness Hypothese und der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese bedeutet das, dass die Information beider Sinneskanäle zu einer Größe gewichtet wird und damit die Information beider Sinneskanäle in das Urteil eingehen. Auch für diese Annahme existieren in der Literatur Hinweise, die zumindest gegen die ausschließliche Gültigkeit der Modality Appropriateness Hypothese sprechen. In diesen Untersuchungen wird berichtet, wie zusätzliche sensorische Information den Einfluss der dominanten Modalität modulieren, was als "capture"- oder "Ventriloquist Effekt" beschrieben wird (z.B. Fenrich & Corballis, 2001; Morein-Zamir, Soto-Faraco & Kingstone, 2003; Recanzone, 2003). Einige neuere Arbeiten befassten sich mit der intermodalen Verarbeitung der haptischen und visuellen Modalität. Darin weist vieles darauf hin, dass bimodale Information über unterschiedliche Sinneskanäle integriert wird, um so die

Wahrnehmungsleistung zu optimieren (z. B. Ernst & Banks, 2002; Ernst, Banks, & Bühlhoff, 2000; siehe auch Alais & Burr, 2004; Van Beers & Wolpert, 2002). Die Autoren formulierten quantitative Modelle zur Beschreibung, dass die sensorische Information aus mehreren Kanälen zu einem Optimum integriert wird. Ein Optimum in diesem Sinne bedeutet, dass die Informationen mehrerer voneinander unabhängigen Sinneskanäle derart kombiniert werden, dass ein multimodales Intervall mit der minimal möglichen Varianz bzw. der maximal möglichen Reliabilität entsteht. Dieses Prinzip wird als multimodale Integration bzw. Cue Integration (Alais & Burr, 2004) oder als Optimal Integration Hypothese (Ernst & Banks, 2002) bezeichnet. Ernst und Banks (2002) gehen davon aus, dass die Information zweier Modalitäten über Prozesse, die sich mit Maximum - Likelihood - Schätzungen nachbilden lassen, integriert werden. Damit kann die Information beider Modalitäten zu einem Optimum integriert werden (siehe auch Alais & Burr, 2004). Das bedeutet, dass die Varianz des Gesamturteils W immer unter der der einer einzelnen liegen sollte (Bresciani, Dammeier & Ernst, 2006; Ernst & Banks, 2002; Gepshtein & Banks, 2003; Gepstein, Burge, Ernst & Banks, 2005):

$$Var(W) = \frac{Var(Y) \cdot Var(X)}{Var(Y) + Var(X)} \leq \min[Var(X), Var(Y)]$$

Inzwischen liegen für die Kombination von der haptischen und der visuellen Modalität einige Daten vor, die für dieses Prinzip sprechen (Ernst & Banks, 2002; Gepshtein & Banks, 2003; Gepstein et al., 2005). Andere Arbeiten liefern Evidenz für die bimodale Integration bei der Raumwahrnehmung, wobei die auditive und die visuelle Modalität integriert wurden (Alais & Burr, 2004). Für die Zeitwahrnehmung wurden allerdings bislang lediglich

Beobachtungen beschrieben (z. B. Wada et al., 2003) und keine Hypothesen oder Modelle gebildet.

An diesem Punkt wird eine interessante Perspektive des generalisierten Zählermodells deutlich. Da es die auditiven und visuellen Intervalle als Wahrscheinlichkeitsdichten beschreibt, ist es auch in der Lage, eine Funktion darzustellen, die bimodal dargebotene Intervalle beschreibt. Damit lässt sich der bimodale Fall so abbilden, dass die Information beider Modalitäten mit eingehen und die Reliabilität optimiert wird. Diese Integration beider Modalitäten wurde mathematisch ausgedrückt. Das Vorgehen ist identisch zu dem im ersten Experiment, nur dass nun für das Standardintervall statt der Verteilungsdichte über eine Modalität die Verteilungsdichte über zwei Modalitäten eingeht.

Die unspezifische Größe, die die Information des bimodalen Intervalls abbildet, beinhaltet Anteile der auditiven und der visuellen Modalität. Das Verhältnis, in dem die beiden Modalitäten zueinander gewichtet werden, wird durch den Faktor g beschrieben, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Damit setzt sich die Verteilungsfunktion $W(t)$ eines bimodalen Intervalls der Modalitäten x und y aus den Funktionen $N_x(t)$ und $N_y(t)$ zusammen, die statistisch gewichtet werden:

$$W(t) = g \cdot N_x(t) + (1-g) \cdot N_y(t) \quad (10)$$

und damit ergibt sich der Erwartungswert der bimodalen Verteilungsfunktion:

$$E[W(t)] = g \cdot E[N_x(t)] + (1-g) \cdot E[N_y(t)] \quad (11)$$

Damit lassen sich zwei Fälle unterscheiden. Wenn $g = 1$ bzw. $g = 0$ ist, dann wird die Information einer Modalität nicht berücksichtigt und es sollten sich

keine Unterschiede zwischen der bimodalen und der unimodalen Darbietung ergeben. Bei der Zeitwahrnehmung würde dann die visuelle Information zugunsten der auditiven vernachlässigt (Wada et al., 2003; Welch & Warren, 1980; Welch et al., 1986). Das bedeutet z. B., dass bimodal - visuelle Durchgänge mit der gleichen Diskriminationsleistung beurteilt werden sollten wie auditiv - visuelle. Im Unterschied zu den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese postuliert das Zählermodell jedoch, dass dieser Effekt nicht nur bei kurzen, sondern auch bei langen Zeitdauern auftreten sollte.

Der zweite Fall wird durch $0 < g < 1$ beschrieben. In diesem Fall tritt eine bimodale Integration auf, die durch die weiteren Gleichungen beschrieben wird.

Die Varianz von $W(t)$ ist somit:

$$Var[W(t)] = g^2 \cdot Var[N_x(t)] + (1-g)^2 \cdot Var[N_y(t)] \quad (12)$$

oder einfacher:

$$Var(W) = g^2 \cdot Var(X) + (1-g)^2 \cdot Var(Y) \quad (13)$$

Bei der bimodalen Darbietung eines Signals soll die Information derart gewichtet werden, dass die Varianz minimiert wird. Daher wird Gleichung (13) nach dg abgeleitet:

$$\frac{d Var(W)}{dg} = 2 \cdot g \cdot Var(X) + 2 \cdot (1-g) \cdot (-1) Var(Y) = 0 \quad (14)$$

Daraus folgt für g :

$$g = \frac{Var(Y)}{Var(X) + Var(Y)} \quad (15)$$

Und somit:

$$\text{Var}(W) = \left(\frac{\text{Var}(Y)}{\text{Var}(X) + \text{Var}(Y)} \right)^2 \cdot \text{Var}(X) + \left(\frac{\text{Var}(X)}{\text{Var}(Y) + \text{Var}(X)} \right)^2 \cdot \text{Var}(Y) \quad (16)$$

Und so ergibt sich:

$$\text{Var}(W) = \frac{(\text{Var}(Y))^2 \cdot \text{Var}(X) + (\text{Var}(X))^2 \cdot \text{Var}(Y)}{(\text{Var}(Y) + \text{Var}(X))^2} = \frac{\text{Var}(Y) \cdot \text{Var}(X)}{\text{Var}(Y) + \text{Var}(X)} \quad (17)$$

Einige Werte sollen die Zusammenhänge verdeutlichen. Setzt man $\text{Var}(X) = \text{Var}(Y)$, z. B. $\text{Var}(X) = 10$ und $\text{Var}(Y) = 10$, so ergibt sich $\text{Var}(W) = 5$. Verringert man $\text{Var}(Y)$ auf 5, so ergibt sich für $\text{Var}(W) = 3.3$, mit $\text{Var}(Y) = 1$ ergibt sich für $\text{Var}(W) = 0.9$. Das bedeutet, dass bereits eine erkennbare Optimierung oder Varianzreduzierung auftreten sollte, wenn sich die Varianzen der beiden Modalitäten nicht oder kaum unterscheiden. Je größer die Unterschiede zwischen den Varianzen der Modalitäten werden, umso mehr verlagert sich die Gesamtvarianz in Richtung der Modalität mit der geringeren Varianz. In jedem Fall sollte sich die Varianz eines bimodal dargebotenen Intervalls gegenüber einem unimodal dargebotenen verringern. Konkret bedeutet das, dass ein bimodales Intervall genauer diskriminiert werden sollte als ein auditives und natürlich auch als ein visuelles. Dies ist ein Unterschied zu den Vorhersagen der Modality Appropriateness Hypothese bzw. der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese (siehe auch Gepshtein & Banks, 2003; Gepshtein et al., 2005). Denn wenn im Sinne der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese nur die auditive Modalität für das Urteil zugrunde gelegt wird, sollte ein bimodales Intervall genau so wie ein auditives und nicht genauer wahrgenommen werden.

Gleichung (3) beschreibt die Varianz eines Durchgangs:

$$\text{Var}[D(t_s, t_c)] = \text{Var}[N(t_s)] + \text{Var}[N(t_c)] = \frac{t_s \cdot \sigma_s^2}{\mu_s^3} + \frac{t_c \cdot \sigma_c^2}{\mu_c^3} \quad (3)$$

Setzt man Gleichung (17) in Gleichung (3) ein, so ergibt sich:

$$\text{Var}[D(t_s, t_c)] = \frac{\frac{\sigma_y^2 \cdot \sigma_x^2}{\mu_y^3 \cdot \mu_x^3}}{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3} + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3}} \cdot t_s + \frac{\sigma_c^2}{\mu_c^3} \cdot t_c \quad (18)$$

Gleichung (18) beschreibt die Varianz der Intervallfolge bimodal - unimodal, wobei x und y die Parameter der beiden Modalitäten des bimodalen Intervalls S_1 und c der Parameter des unimodalen Intervalls V_2 sind.

Für den Erwartungswert der Intervallfolge bimodal - unimodal gilt mit:

$$\begin{aligned} D &= W(t_s) - N_c(t_c) \\ E(D) &= E[W(t_s)] - E[N_c(t_c)] \\ &= g \cdot E[N_x(t_s)] + (1 - g) \cdot E[N_y(t_s)] - E[N_c(t_c)] \end{aligned} \quad (19)$$

und mit Gleichung (2), die den Erwartungswert eines Durchgangs beschreibt:

$$E[D(t_s, t_c)] = E[N(t_s)] - E[N(t_c)] = \frac{t_s}{\mu_s} - \frac{t_c}{\mu_c} \quad (2)$$

gilt daraus:

$$E(D) = \frac{\sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3 \cdot \mu_x^2}} + \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3 \cdot \mu_y^2}}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3}} + \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3}}} \cdot t_s - \frac{t_c}{\mu_c} \quad (20)$$

Gleichung (4) beschreibt die psychometrische Funktion eines Durchgangs:

$$P\{''C > S'' \mid t_s, t_c\} = \Phi \left[\frac{0 - E[D(t_s, t_c)]}{\sqrt{\text{Var}[D(t_s, t_c)]}} \right] = \Phi \left[\frac{\frac{t_c}{\mu_c} - \frac{t_s}{\mu_s}}{\sqrt{\frac{t_s \cdot \sigma_s^2}{\mu_s^3} + \frac{t_c \cdot \sigma_c^2}{\mu_c^3}}} \right] \quad (4)$$

Setzt man die entsprechenden Werte für das bimodale Standardintervall ein, so ergibt sich:

$$P\{''C > S'' \mid t_s, t_c\} = \Phi \left(\frac{\frac{t_c}{\mu_c} - \frac{\sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3 \cdot \mu_x^2}} + \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3 \cdot \mu_y^2}}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3}} + \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3}}} \cdot t_s}{\sqrt{\frac{\sigma_y^2 \cdot \sigma_x^2}{\mu_y^3 \cdot \mu_x^3}} \cdot t_s + \frac{\sigma_c^2}{\mu_c^3} \cdot t_c} \right) \quad (21)$$

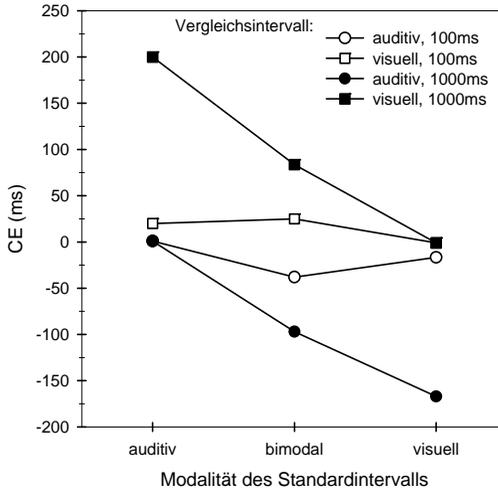
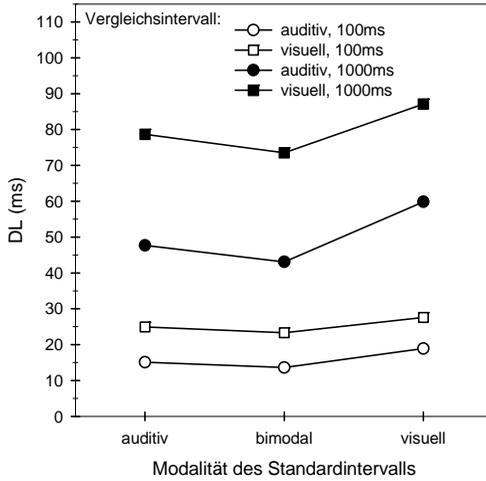


Abbildung 13: Vorhersage des Zählermodells zu Experiment 4 für DL und CE als Funktion der Standarddauer, der Modalität des Standardintervalls S_1 und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 .

Diese Gleichung wurde mit den Parametern aus Experiment 1 spezifiziert und die Vorhersagen in Abbildung 13 dargestellt⁵. Dort ist analog zur Vorhersage für Experiment 1 (Abbildung 6) sowie den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese (Abbildung 12) auf der Abszisse die Modalität des Standardintervalls aufgetragen, was einen direkten Vergleich der beiden Abbildungen ermöglicht. Im Unterschied zu den Abbildungen für die ersten drei Experimente sind hier die Werte für die Durchgänge mit Vergleichsintervallen der jeweils gleichen Modalität miteinander verbunden. Die Vorhersagen des Zählermodells treten wieder bei langen und kurzen Zeitdauern gleichermaßen auf und weisen erneut auf einen deutlichen Einfluss des Vergleichsintervalls hin. Theoretisch wichtig sind hier die Vorhersagen des generalisierten Zählermodells dazu, wie die Information der Modalitäten bei Durchgängen mit bimodalem Standardintervall gewichtet wird. Im Gegensatz zur sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese wird hier nicht vorhergesagt, dass nur die auditive Modalität berücksichtigt wird, sondern dass eine Gewichtung beider Modalitäten stattfindet. Das lässt sich am besten im Zusammenhang mit den kongruenten und inkongruenten Durchgängen zeigen. Wenn man diese Durchgänge miteinander vergleicht, also z. B. alle Werte mit dem visuellen Vergleichsintervall bei 1000 ms, so fällt auf, dass der Wert für DL bei bimodalem Standardintervall nicht auf einer Linie mit den beiden anderen liegt, sondern

⁵ Die Optimierung variiert etwas mit den Parametern. Die in dieser Arbeit gewählten und durchgehend verwendeten Parameter ergeben für den bimodalen Standard ein relatives Optimum (auditive Intervalle: $\mu = 10$ ms, $\sigma = 4$ ms, visuelle Intervalle: $\mu = 13$ ms, $\sigma = 10$ ms). Bei anderen Parameter gleichen sich die Werte bimodal - auditiv mehr an auditiv - auditiv, die von bimodal - visuell mehr an visuell - auditiv an. Je weiter die Werte auseinander liegen, desto stärker macht sich der Einfluss der dominanten auditiven Modalität bemerkbar. Der Effekt des Vergleichsintervalls bleibt in jedem Fall erhalten.

darunter. Damit sagt das Zählermodell eine Optimierung und eine tendenzielle Verbesserung der Wahrnehmung vorher, die durch eine Integration der Modalitäten entsteht. Das wird bei den Kurven mit visuellem Vergleichsintervall deutlich, indem Durchgänge mit bimodalem Standardintervall genauer als kongruente visuell - visuelle Durchgänge diskriminiert werden sollten. Entsprechend sollte bei Durchgängen mit auditivem Vergleichsintervall die Diskriminationsleistung bei bimodal - auditiven Durchgängen unter der von auditiv - auditiven liegen. Dieser Integrationseffekt wird gleichermaßen für kurze und lange Zeitdauern vorhergesagt.

Bezüglich CE führt das bimodale Standardintervall dazu, dass die Werte für CE zwischen den kongruenten und den inkongruenten Werten liegen. Während also die bimodale Darbietung bezüglich DL zu einer Optimierung führt, führt sie bezüglich CE zu einem Mittelwert zwischen kongruenten und inkongruenten Durchgängen. Das ist in Hinblick auf die Modality Appropriateness Hypothese bedeutsam. Wenn nämlich die Information der visuellen Modalität zugunsten der auditiven vernachlässigt würde, müsste CE zumindest bei bimodal - auditiven Durchgang Null sein. Damit zeigt die Vorhersage des Zählermodells bezüglich CE ebenfalls deutlich, dass bei der bimodalen Darbietung die Informationen beider Modalitäten in das Urteil mit eingehen sollten.

In diesem Experiment sollen Durchgänge mit bimodalem Standardintervall unimodalen kongruenten und inkongruenten gegenübergestellt werden. Ziel dabei war es, herauszufinden, ob sich die Vorgänge bei der Zeitverarbeitung eher im Sinne der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese oder des generalisierten Zählermodells beschreiben lassen. Gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese sollte bei kurzen

Zeitdauern deutlich werden, dass bei bimodaler Darbietung die visuelle Modalität zugunsten der auditiven vernachlässigt wird. Wenn sich die Vorgänge besser durch das generalisierte Zählermodell abbilden lassen, sollte die bimodale Darbietung bezüglich DL zu einer Gewichtung der Information führen. Dieser Effekt sollte sich bezüglich CE als Art Mittelung zeigen, indem die wahrgenommene Länge eines bimodalen Intervalls zwischen der eines visuellen und eines auditiven liegen sollte.

5.1 Methode

Versuchspersonen. Eine neue Stichprobe von zwanzig Studierenden, davon 16 Frauen und 4 Männer, nahmen an diesem Experiment teil. Die jüngste Versuchsperson war 19, die älteste 35 Jahre alt ($M = 24.0$, $SD = 4.9$). Alle Versuchspersonen verfügten über normale visuelle und auditive Fähigkeiten und nahmen unter den gleichen Bedingungen wie in den vorangegangenen Experimenten an der Studie teil.

Apparatur und Reize. Alles war wie in den Experimenten 1-3.

Durchführung. In diesem Experiment bestand die sensorische Manipulation darin, dass das Standardintervall bimodal präsentiert wurde. Das Vergleichsintervall war weiterhin auditiv oder visuell. Dieser Manipulation wurde anderen, kongruenten und inkongruenten unimodalen Trials gegenübergestellt. Das ergab einen dreifaktoriellen Versuchsplan mit den Faktoren Standarddauer (100 ms, 1000 ms), Modalität des Vergleichsintervalls V_2 (auditiv, visuell) und Modalität des Standardintervalls S_1 (auditiv, visuell, bimodal). Das Standardintervall wurde nun wieder an erster Stelle des Intervallpaares dargeboten und das Vergleichsintervall an zweiter Stelle,

$S_1 - V_2$. Damit sollten die Ergebnisse stabiler gehalten werden und besser mit denen der ersten beiden Experimente verglichen werden können. Das Experiment wurde in 6 Blöcke pro Standarddauer (100 und 1000 ms) unterteilt, visuell - visuell, auditiv - visuell, bimodal - visuell, visuell - auditiv, auditiv - auditiv, bimodal - auditiv. Die Anzahl der Durchgänge pro Experimentalblock betrug 40, so dass das Experiment pro Standarddauer insgesamt 360 Experimentaldurchgänge zuzüglich 24 Trainingsdurchgänge umfasste. Die Durchgänge wurden nach Modalität und Standarddauer geblockt dargeboten, die Reihenfolge der Blöcke bezüglich der Kongruenzbedingungen wurde über die Versuchspersonen nach der Methode des balancierten Lateinischen Quadrats ausbalanciert.

5.2 Ergebnisse

Über die Faktoren Standarddauer, Modalität des Standardintervalls und Modalität des Vergleichsintervalls wurde für CE und DL eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung gerechnet. Die durchschnittlichen Werte von DL und CE als Funktion der Standarddauer, der Modalität S_1 und der Modalität V_2 sind in Abbildung 14 dargestellt. Darauf ist zu erkennen, dass sich das Interaktionsmuster zwischen kongruenten und inkongruenten Durchgängen sowie der deutliche Effekt der Modalität des Vergleichsintervalls, die bereits in den ersten beiden Experimenten auftraten, replizieren ließen. Bezüglich DL fällt auf, dass die bimodale Darbietung des Standardintervalls bei kurzen und langen Zeitdauern eher gleichartig verarbeitet wurde, was erneut im Widerspruch zu den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese steht. Allerdings führte das bimo-

dale Standardintervall auch nicht zu einer absoluten Verbesserung der Diskriminationsleistung gegenüber den Durchgängen mit unimodalen Standardintervallen, wie es das Zählermodell postulierte. Bei Durchgängen mit auditivem Vergleichsintervall wurden bimodal- auditive Durchgänge gleichartig wie auditiv - auditive diskriminiert, was die Modality Appropriateness Hypothese postuliert.

Allerdings bestätigt die Modality Appropriateness Hypothese das Ergebnismuster für Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall nicht, denn laut ihr hätten bimodal - visuelle Durchgänge so genau wie auditiv - visuelle diskriminiert werden müssen. Das traf nicht zu, da bimodal - visuelle Durchgänge ähnlich genau wie visuell - visuelle beurteilt wurden. Hier ergaben sich Hinweise für einen Integrationseffekt. Bezüglich CE fällt auf, dass bei Durchgängen mit visuellem Vergleichsintervall die Ergebnisse für eine Mittelung gemäß den Vorhersagen des Zählermodells sprechen. Bei Durchgängen mit einem visuellen Vergleichsintervall verringert sich der CE durch die bimodale Darbietung. Für Durchgänge mit einem auditiven Vergleichsintervall fällt diese Mittelung deutlich geringer aus, damit scheint die auditive Modalität für die Beurteilung maßgeblich gewesen zu sein.

Unterschiedsschwelle DL. Analog zum ersten Experiment lagen die durchschnittlichen Werte für DL bei kurzen Standarddauern deutlich unter denen der langen, $F(1,19) = 183.7, p < .001$ (16 vs. 87 ms). Wie nach den Vorhersagen zu erwarten war, wurden Durchgänge mit einem visuellen Vergleichsintervall schlechter diskriminiert, $F(1,19) = 57.4, p < .001$ (37 vs. 66 ms) und der Effekt nahm mit der Standarddauer zu, $F(1,19) = 9.2, p = .007$.

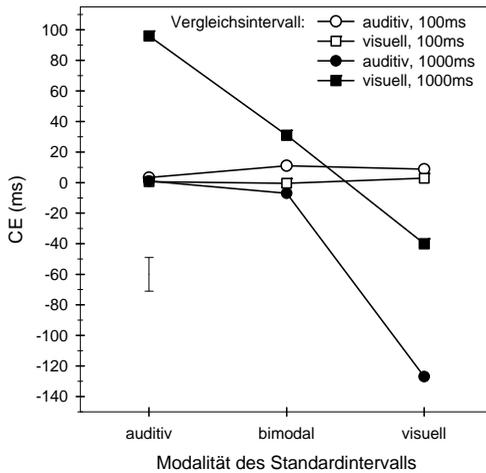
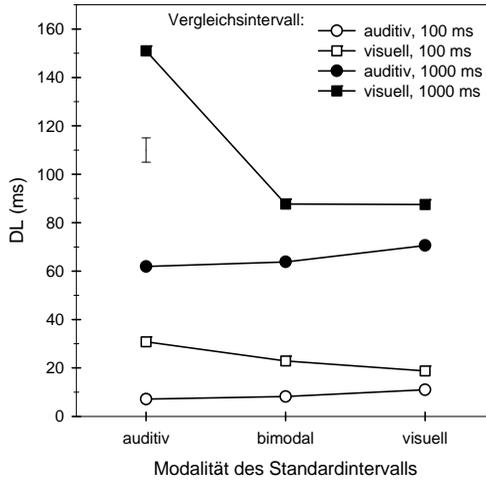


Abbildung 14: Ergebnisse von Experiment 4 für DL und CE als Funktion der Standarddauer, der Modalität des Standardintervalls S_1 und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 .

Wie Abbildung 14 nahe legt, ergab sich auch ein Haupteffekt bezüglich der Modalität des Standardintervalls, $F(1,19) = 11.0, p < .001$ (63 vs. 47 vs. 46 ms), der ebenfalls mit der Standarddauer zunahm, $F(1,19) = 8.6, p = .001$, und außerdem von der Modalität des Vergleichsintervalls moduliert wurde, $F(1,19) = 17.9, p < .001$. Dies zeigt, dass die Diskriminationsleistung bei Durchgängen mit einem visuellen Vergleichsintervall sehr viel sensitiver auf die Modalität des Standardintervalls reagiert. Damit ergeben sich Hinweise dafür, dass bei Durchgängen mit einem visuellen Vergleichsintervall die bimodale Information des Standardintervalls gewichtet wurde. Am schlechtesten konnten die Versuchspersonen Durchgänge beurteilen, in denen ein auditives Intervall von einem visuellen gefolgt wurde. Wenn nun die Versuchspersonen bei einem bimodalen Standardintervall nur die auditive Information berücksichtigt hätten, hätten bimodal - visuelle Durchgänge ebenso ungenau diskriminiert werden müssen. Als letztes Ergebnis ergab sich noch eine Interaktion über alle drei Faktoren, $F(1,19) = 7.2, p = .002$.

Konstanter Fehler CE. Im Einklang mit den Ergebnissen dieser Arbeit wurden visuelle Vergleichsintervalle kürzer eingeschätzt als auditive, $F(1,19) = 5.8, p = .026$ (-18 vs. 15 ms), was mit der Standarddauer zunahm, $F(1,19) = 12.2, p = .002$. Außerdem ergab sich ein Effekt der Modalität des Standardintervalls, $F(1,19) = 14.8, p < .001$ (-39 vs. 25 vs. 9 ms), was ebenfalls bei längeren Intervallen deutlicher wurde, $F(1,19) = 20.5, p < .001$. Damit ließ sich der Effekt, dass der CE bei langen Standarddauern deutlicher wird, auch in diesem Experiment replizieren. Interessant ist, dass die Vorhersagen des Zählermodells, denen zufolge die bimodale Darbietung zu einer Mittelung führen sollte, zumindest für Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall bestätigt wurden. Analog zu den Ergebnissen bezüglich

DL diskriminieren die Ergebnisse bei Durchgängen mit auditivem Vergleichsintervall nicht zwischen den Annahmen der auditiven Dominanz und der bimodalen Integration.

5.3 Diskussion

Sensorisch - kognitive Kodierungshypothese. In diesem Experiment sollte untersucht werden, ob der Kongruenzeffekt der ersten drei Experimente insbesondere bei langen Zeitdauern möglicherweise durch den Modalitätenwechsel hervorgerufen worden war. Dies konnte nicht bestätigt werden, denn die durch die Modalitäten bedingten Einflüsse zeigten sich erneut und nahmen auch in diesem Experiment mit der Zeitdauer durchweg zu. Die Ergebnisse bestätigten für Durchgänge mit auditivem Vergleichsintervall das Prinzip der auditiven Dominanz und die Vorhersagen der Modality Appropriateness Hypothese, allerdings entgegen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese bei langen Zeitdauern deutlicher als bei kurzen. Damit ergab auch dieses Experiment keine Evidenz dafür, dass lange Zeitdauern anders als kurze über amodale Codes repräsentiert werden. Ein weiterer Punkt, der die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese in Frage stellt, betrifft die Ergebnisse bei Durchgängen mit visuellen Vergleichsintervallen, bei denen die Vorhersagen der Modality Appropriateness Hypothese nicht bestätigt werden konnten. Denn bei Durchgängen mit visuellem Vergleichsintervall wurden bimodal - visuelle Durchgänge nicht wie auditiv - visuelle, sondern wesentlich genauer wahrgenommen. Bei diesen Durchgängen, so legen es die Ergebnisse nahe, muss die bimodale Information des Standardintervalls zur Zeitwahrnehmung verwendet

worden sein. Damit lassen die Ergebnisse nicht den Schluss zu, dass die Zeitwahrnehmung kurzer Intervalle über voneinander getrennte sensorische Kanäle erfolgt. Gegen die nach Modalitäten getrennte Verarbeitung kurzer Zeitdauern spricht auch, dass Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall ungenauer als solche mit auditivem Vergleichsintervall diskriminiert wurden. Dieser Befund repliziert auch die Ergebnisse der Experimente 1 und 2.

Neuronales Zählermodell. Insgesamt bestätigten die Ergebnisse die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells nur teilweise. Erneut zeigte sich, dass lange und kurze Zeitdauern über gleichartige modalitätsspezifische Prozesse verarbeitet werden. Jedoch ergaben die Ergebnisse keine Hinweise dafür, dass die bimodale Darbietung zu einer absoluten Verbesserung von DL gegenüber der unimodalen Darbietung führt. Auch ein weiterer Befund dieses Experimentes war vom Zählermodell nicht vorhergesagt worden: Bei Durchgängen mit auditivem Vergleichsintervall wurde die visuelle Information innerhalb des bimodalen Standardintervalls vernachlässigt und die beobachtete auditive Dominanz trat auf. Dies entspricht dem Konzept der Modality Appropriateness Hypothese nach Welch et al. (1986) oder dem der auditiven Dominanz. Andererseits trat eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit bei Durchgängen mit visuellem Vergleichsintervall und bimodalem Standardintervall gegenüber auditiv - visuellen Durchgängen ein. Wenn zur Zeitwahrnehmung lediglich die dominante auditive Information verwendet worden wäre, hätte das gemäß den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zu einer Angleichung der Werte der Durchgänge auditiv - visuell und bimodal - visuell führen müssen. Dies trat jedoch nicht ein, stattdessen erfolgte eine Angleichung der Werte von bimodal - visuell und visuell - visuell. Damit ergeben sich Hin-

weise für eine Integration der Information aus der auditiven und visuellen Modalität des Standardintervalls. Dies zeigt sich an den Werten für DL und CE gleichermaßen, denn auch bezüglich CE stimmten die Ergebnisse für Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall besser mit den Vorhersagen überein als für die mit auditivem Vergleichsintervall.

Zusammenfassung. Die Erklärungen für die Ergebnisse bleiben insgesamt unklar, da sie nicht eindeutig zwischen den Vorhersagen der bimodalen Integration und der auditiven Dominanz diskriminieren. Dies zunächst überraschende Ergebnis, dem zufolge die Integration der Modalitäten des Standardintervalls von der Modalität des Vergleichsintervalls beeinflusst wird, lässt sich möglicherweise anhand von Literaturbefunden erklären. Einige Arbeiten berichten, dass die Unsicherheit oder die Reliabilität der für die Wahrnehmungsleistung dominanten Modalität einen Einfluss auf die Gewichtung hat. Damit findet eine flexible Gewichtung statt. So berichten Van Beers et al. (2002), dass die visuelle Modalität und die Eigenwahrnehmung je nach Bewegungsrichtung in unterschiedlicher Gewichtung in das bimodale Wahrnehmungsurteil eingehen. Die Gewichtung der beiden Modalitäten erfolgte derart, dass der Einfluss der dominanten visuellen Modalität zurückging, wenn ihre Information für die Wahrnehmungsleistung deutlich unreliabler wurde. Heron, Whitaker und McGraw (2004) manipulierten in einer Arbeit über die Integration der auditiven und der visuellen Modalität bei der Raumwahrnehmung gezielt die Reliabilität der beiden Signale. Die Autoren fanden heraus, dass die relative sensorische Unsicherheit den Integrationsvorgang maßgeblich beeinflusst. Integrationsvorgänge traten erst dann auf, wenn die bei der Raumwahrnehmung dominante visuelle Modalität unreliable Information lieferte. In einer Untersu-

chung zum intermodalen Einfluss auf die Zeitwahrnehmung berichten Wada et al. (2003), dass sie eine Asymmetrie der gegenseitigen Beeinflussung zwischen der auditiven und der visuellen Modalität fanden, indem die Information der auditiven Modalität die der visuellen Modalität stärker beeinflusste als umgekehrt. Sie fanden auch, dass die Reliabilität der Modalitäten in das Urteil eingeht.

Daraus wird ein anderer Ansatz zur Überprüfung der bimodalen Integration entwickelt: Bimodale Integration tritt insbesondere dann auf, wenn die Information der dominanten Modalität unreliabel wird und dann die weniger dominanten Modalität das Urteil stärker als die dominante beeinflusst (Van Beers et al., 2002; Wada et al., 2003). Solange die Information der dominanten Modalität dem Wahrnehmungsurteil maßgeblich zugrunde liegt, wird ihre Information verwendet und die der unreliableren Modalität vernachlässigt. Damit wird beschrieben, dass der in der Gleichung (10) mit

$$W(t) = g \cdot N_x(t) + (1 - g) \cdot N_y(t) \quad (10)$$

eingeführte Gewichtungsfaktor g je nach Situation Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Wenn die Information der dominanten Modalität hinreichend reliabel ist, ist $g = 0$ und die Information der anderen Modalität wird vernachlässigt. Diese Annahmen lassen sich auf die Ergebnisse übertragen. Da Durchgänge mit einem auditiven Vergleichsintervall in allen Experimenten dieser Arbeit genauer diskriminiert wurden als solche mit einem visuellen, liegt bei Durchgängen mit einem auditiven Vergleichsintervall die Information der dominanten Modalität reliabel vor. Als Folge davon würde demnach die Information der visuellen Modalität vernachlässigt. Wenn hingegen die auditive Information unreliabel wird, wie es bei Durchgängen mit einem visuellen Vergleichsintervall der Fall ist, sollte eine fle-

xible Gewichtung eintreten, die zu einer Varianzreduzierung führt. Dies ist möglicherweise der Grund dafür, dass sich die Werte von DL bei bimodal - visuellen Durchgängen im Gegensatz zu bimodal - auditiven verringerten.

Allerdings wurde bisher nicht berücksichtigt, dass eine deutliche Varianzminimierung durch bimodale Integration im Sinne von Bresciani et al. (2006) und Gepshtein et al. (2003; 2005) bei der Zeitwahrnehmung möglicherweise nur dann auftritt, wenn beide Intervalle, Standard- und Vergleichsintervall, bimodal dargeboten werden. Aus diesem Grund soll nun ein Experiment mit bimodal - bimodalen Durchgängen durchgeführt werden. Nach Bresciani et al. (2006) sowie Gepshtein et al. (2003; 2005) sollte sich bei bimodal - bimodalen Durchgängen eine generelle Verbesserung der Diskriminationsleistung einstellen. Dies lässt sich auch mit dem Attentional - Gate Modell begründen. Bei der Abfolge bimodal - bimodal träte nun überhaupt kein Modalitätenwechsel und damit auch kein Aufmerksamkeitsverlust mehr auf, der im Sinne des Attentional - Gate Modells die Zeitwahrnehmung beeinträchtigen könnte.

6. Experiment 5: Standard- und Vergleichsintervall bimodal

Da die vom Zählermodell vorhergesagte generelle Verbesserung der Diskriminationsleistung in Experiment 4 nicht eintrat, soll nun überprüft werden, ob sich eine Verbesserung einstellt, wenn nicht nur das Standardintervall, sondern auch das Vergleichsintervall bimodal dargeboten wird. Denn dann liegt die optimale Information der Modalitäten in beiden Intervallen vor. Es ist auch möglich, dass das Vergleichsintervall zur Optimierung der Wahrnehmungsleistung die bimodale Information benötigt, da es sich in den vorangegangenen Experimenten als Faktor erwiesen hat, der die gesamte Zeitwahrnehmung erheblich beeinflusst. Um zu überprüfen, ob bimodal - bimodale Durchgänge im Vergleich zu bimodal - unimodalen genauer diskriminiert werden, soll das Vergleichsintervall bimodal oder unimodal dargeboten werden.

Die Vorhersagen des Zählermodells wurden analog zum bimodalen Standardintervall auch für das bimodale Vergleichsintervall hergeleitet. Die Gleichung für bimodal - bimodale Durchgänge lautet:

$$P\{''C > S'' \mid t_s, t_c\} = \Phi \left(\frac{\sqrt{\frac{\sigma_b^2}{\mu_b^3 \cdot \mu_a^2} + \frac{\sigma_a^2}{\mu_a^3 \cdot \mu_b^2}} \cdot t_c - \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3 \cdot \mu_x^2} + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3 \cdot \mu_y^2}} \cdot t_s}{\sqrt{\frac{\sigma_a^2}{\mu_a^3} + \frac{\sigma_b^2}{\mu_b^3}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^3} + \frac{\sigma_y^2}{\mu_y^3}}} \right) \quad (22)$$

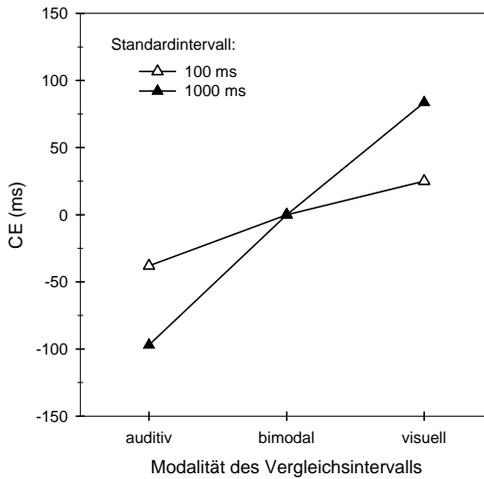
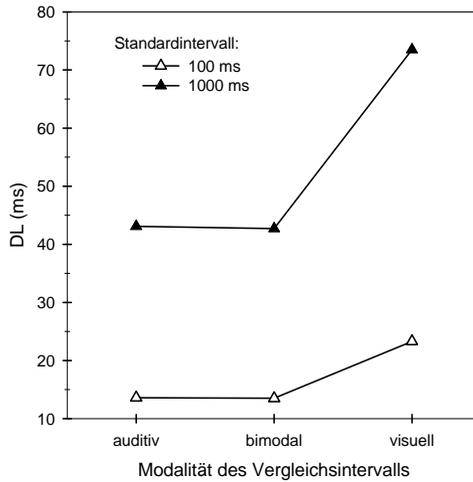


Abbildung 15: Vorhersagen des Zählermodells zu Experiment 5 für DL und CE als Funktion der Standarddauer und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 .

Dabei stellen x und y die Parameter der beiden Modalitäten im bimodalen Intervall S_1 sowie a und b die Parameter des bimodalen Intervalls V_2 dar. Der Aufbau lässt sich leicht anhand der Herleitungen der vorangegangenen Experimente nachvollziehen.

Die Vorhersagen für die bimodal - bimodalen Durchgänge sind in Abbildung 15 zusammen mit denen für die bimodal - unimodalen Durchgänge dargestellt. Bezüglich DL fällt auf, dass das Zählermodell für bimodal - bimodale Durchgänge keine bzw. eine kaum wahrnehmbare Verbesserung der Genauigkeit gegenüber den bimodal - auditiven vorhersagt, allerdings eine Angleichung. Demnach führt ein bimodales Vergleichsintervall bei einem bimodalen Standardintervall zu keinem zusätzlichen Reliabilitätsgewinn. Die Vorhersagen bezüglich CE ergeben, dass der konstante Fehler für bimodal - bimodale Durchgänge Null wird. Dies leuchtet ein, da es sich ja um kongruente Durchgänge handelt.

Die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese werden hier nicht eigens diskutiert, da sie für kurze Zeitdauern identisch mit den Vorhersagen des Zählermodells sind. Außerdem ergaben die Ergebnisse aller Experimente dieser Arbeit keine Hinweise dafür, dass lange Zeitdauern amodal vermittelt werden.

6.1 Methode

Versuchspersonen. Eine neue Stichprobe von 20 Studenten, davon 19 Frauen und 1 Mann, nahmen an diesem Experiment teil. Die jüngste Versuchsperson war 19, die älteste 47 Jahre alt ($M = 24.3$, $SD = 7.5$). Alle Versuchspersonen verfügten über normale visuelle und auditive Fähigkeiten

und nahmen unter den gleichen Bedingungen wie in den vorangegangenen Experimenten an der Studie teil.

Apparatur, Reize und Design. Die Dauer des Standardintervalls wurde blockweise geändert und über die Versuchspersonen ausbalanciert. Die Hälfte aller Versuchspersonen absolvierte zuerst drei Blöcke mit kurzen Standardintervallen (100 ms) und danach drei weitere Blöcke mit langen Standardintervallen (1000 ms). Die zweite Hälfte absolvierte die beiden Standarddauern in der umgekehrten Reihenfolge. Insgesamt wurde das Experiment in drei Blöcke pro Standarddauer (100 und 1000 ms) unterteilt, bimodal - bimodal, bimodal - visuell, bimodal - auditiv. Jeder Block beinhaltete 60 Durchgänge, die bezogen auf ihre Modalitäten randomisiert dargeboten wurden. Damit sollte überprüft werden, ob die gefundenen Ergebnisse stabil sind. Pro Standarddauer wurden 36 Trainingsdurchgänge durchgeführt, die nicht ausgewertet wurden, so dass jede Versuchsperson insgesamt 432 Durchgänge absolvierte. Damit ergab sich ein zweifaktorieller Versuchsplan mit den Faktoren Standarddauer (100 vs. 1000 ms) und Vergleichsintervall (bimodal, auditiv, visuell).

6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 mit DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer und der Modalität des Vergleichsintervalls dargestellt. Die Ergebnisse stimmen bezüglich DL gut mit den Vorhersagen überein. Damit ergeben sich keine Hinweise für eine generelle Verbesserung von DL, wenn beide Intervalle bimodal dargeboten werden. Zugleich

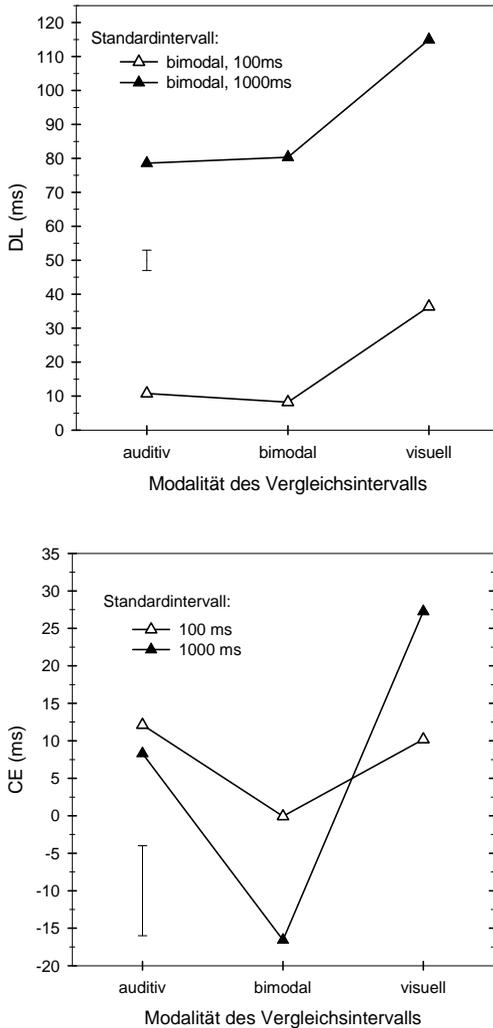


Abbildung 16: Ergebnisse von Experiment 5 für DL und CE als Funktion der Standarddauer und der Modalität des Vergleichsintervalls V_2 .

ließ sich erneut replizieren, dass Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall zumindest tendenziell am ungenauesten wahrgenommen werden. Bezüglich CE liegen die Ergebnisse alle im Bereich von +30 bis -15, was aufgrund des Bereiches und des Standardfehlers, der ca. ein Drittel dieses Bereiches ausmacht, wenig Aussagen zulässt. Auffällig ist allerdings, dass alle Intervalle etwa gleich lang wahrgenommen wurden. Im Gegensatz zu den vorherigen Experimenten betrifft das nicht nur die kurzen, sondern auch die langen Zeitdauern. Dies wird bei Durchgängen mit unimodalen langen Intervallen normalerweise nicht gefunden.

Unterschiedsschwelle DL. DL nahm erwartungsgemäß mit der Standarddauer zu, $F(1,19) = 108.6$, $p < .001$ (18 vs. 91 ms). Durchgänge mit visuellen Vergleichsintervallen wurden deutlich schlechter diskriminiert als solche mit auditiven und bimodalen $F(1,19) = 28.2$, $p < .001$ (76 vs. 45 vs. 44 ms). Damit ließ sich auch bei randomisierter Darbietung replizieren, dass bimodal - visuelle Durchgänge schlechter diskriminiert werden als bimodal - auditive. Theoretisch wichtig ist hier vor allem, dass die bimodal - bimodale Darbietung keine generelle Optimierung bezüglich der Diskriminationsleistung bewirkt. Dieser Effekt veränderte sich nicht mit der Standarddauer, $F < 1$. Damit wurden lange und kurze Zeitdauern gleichartig vermittelt. Dies wurde ja vom neuronalen Zählermodell vorhergesagt.

Konstanter Fehler CE. Bezüglich CE ergab sich lediglich eine Tendenz für die Modalität des Vergleichsintervalls mit $F(1,19) = 2.9$, $p = .089$. Überraschenderweise treten hier die bisher gefundenen Ergebnisse, wonach zum einen auditive Intervalle länger wahrgenommen werden als visuelle und zum anderen CE bei langen Zeitdauern deutlich zunimmt, nicht auf. Dies steht auch im Widerspruch zu den allermeisten Literaturbefunden

(z. B. Ulrich et al., 2006b). Möglicherweise bildet sich durch die bimodale Darbietung eine deutlich stabilere Repräsentation insbesondere bezüglich der wahrgenommenen Länge aus.

6.3 Diskussion

Insgesamt erwiesen sich die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells als geeignet, das Ergebnis von DL vorherzusagen. Gemäß der Hypothese des Zählermodells führte die bimodale Information des Vergleichsintervalls nicht zu einer Verbesserung der Wahrnehmungsleistung, die über die des auditiven Vergleichsintervalls hinausgeht. Dies spricht dagegen, dass Prozesse ablaufen, die zu einer zusätzlichen Optimierung führen, sobald die Information beider Modalitäten bimodal dargeboten wird. Etwas kontraintuitiv und entgegen allen Befunden fielen die Ergebnisse bezüglich CE aus. Hier kam es zu einer deutlichen Verringerung des CE; offensichtlich wurden insbesondere auch die langen Intervalle als annähernd gleich lang wahrgenommen. Das überrascht besonders, weil die Durchgänge randomisiert dargeboten wurden, wodurch nach Penney et al. (2000) die Unterschiede zwischen den Modalitäten bezüglich der wahrgenommenen Länge eher deutlicher werden sollten, wie beim zweiten Experiment dieser Arbeit erläutert wurde. Aus diesem Widerspruch ergeben sich Hinweise dafür, dass die Versuchspersonen aus der Information beider Modalitäten eine stabile Repräsentation bezüglich der wahrgenommenen Länge aufbauen konnten. Offensichtlich wurde die Information beider Modalitäten zum Aufbau einer stabilen Repräsentation genutzt, allerdings nicht in der vom Zählermodell vorhergesagten Weise. Möglicherweise drückt sich der Reliabilitätsgewinn

durch die bimodal - bimodale Darbietung bei der wahrgenommenen Länge deutlicher aus als bei der Genauigkeit.

Zusammenfassung. Die Ergebnisse sprechen bezüglich DL dafür, dass keine zusätzlichen Optimierungseffekte auftreten, wenn die bimodale Information in beiden Intervallen auftritt. Dies war auch vom Zählermodell vorhergesagt worden.

Jedoch soll auch noch auf eine Schwäche des Experiments hingewiesen werden. Obgleich sich die Vorhersagen des Zählermodells bezüglich DL gut bestätigten, kann das Experiment nicht sicherstellen, ob bei bimodal - bimodalen Durchgängen überhaupt die visuelle Information des Vergleichsintervalls genutzt wurde. Möglicherweise orientierten sich die Versuchspersonen ausschließlich an der reliableren auditiven Information, die ihnen im Standard- und im Vergleichsintervall zur Verfügung stand. Obgleich die Versuchspersonen in der Instruktion explizit darauf hingewiesen worden waren, auf die visuelle Modalität zu achten und durch die Randomisierung der Durchgänge eine gewisse Unsicherheit impliziert worden war, könnten die Prozesse unterbewusst abgelaufen sein. So geht Posner (1978) davon aus, dass es viel leichter ist, die Aufmerksamkeit vom visuellen auf den auditiven Reiz zu lenken als umgekehrt. Das könnte bei bimodal - bimodalen Durchgängen dazu geführt haben, dass die visuelle Information des Vergleichsintervalls nicht mehr verarbeitet wurde. Die Vorhersagen der Modality Appropriateness Hypothese kommen zum gleichen Ergebnis, dem zufolge bei bimodaler Darbietung die Modalität mit der unreliableren Information vernachlässigt wird und nur die validere auditive für das Urteil zugrunde gelegt wird (z. B. Welch et al., 1986). Daher ist es kaum möglich,

mit den Ergebnissen dieses Experimentes zwischen der Modality Appropriateness Hypothese und der bimodalen Integration zu diskriminieren.

Damit soll noch einmal auf die bereits in Zusammenhang mit Experiment 4 angesprochene Möglichkeit der flexiblen Gewichtung verwiesen werden. Möglicherweise werden die Gewichtungseffekte bei der Zeitwahrnehmung besonders dann deutlicher, wenn die Information der dominanten Modalität unreliabel ist, was auch in der Literatur berichtet wurde (Heron et al., 2004; Van Beers et al., 2002; Wada et al., 2003). Zum einen ist das nur gegeben, wenn ein Intervall anstelle von beiden bimodal dargeboten wird. Daher sind zur Überprüfung von Integrationseffekten der bimodalen Information Durchgänge mit nur einem bimodalen Intervall geeigneter. Eine zweite Voraussetzung für das Auftreten der flexiblen Gewichtung liegt darin, dass die sensorische Information über beide Intervall gesehen unreliabel wird. In den Experimenten dieser Arbeit stellte sich heraus, dass das zeitlich variable Vergleichsintervall die Genauigkeit in zweierlei Hinsicht beeinflusste, und zwar in Abhängigkeit von seiner Position und seiner Modalität. Auch diese Beobachtung findet sich in der Literatur (z. B. Hellström & Rammsayer, 2004; Michels & Helson, 1954; Wearden et al., 1998). In allen Experimenten dieser Arbeit führte ein visuelles Vergleichsintervall zu ungenaueren Diskriminationsleistungen. Demnach ist zu erwarten, dass flexible Gewichtungseffekte auftreten, wenn das unreliabel wirkende Vergleichsintervall bimodal dargeboten wird. Dies soll in einem letzten Experiment untersucht werden.

7. Experiment 6: Unimodales Standard- und bimodales Vergleichsintervall

Bisher ergaben sich nur zum Teil Hinweise für bimodale Integrationsvorgänge bei der Zeitwahrnehmung, die sich durch die quantitative Formulierung des neuronalen Zählermodells recht gut beschreiben ließen. Insgesamt blieb die Befundlage jedoch unklar. Alles in allem trat keine absolute Varianzminimierung im Sinne von Bresciani et al. (2006) und Gepshtein et al. (2005) auf. Die Ergebnisse der Experimente 4 und 5 ergaben weiterhin, dass eine bimodale Darbietung zu keiner zusätzlichen Erhöhung der Genauigkeit führt, wenn in beiden Intervallen die Information über die dominante auditive Modalität vorliegt. Diese Beobachtung wurde für die Zeitwahrnehmung bereits in der Literatur beschrieben (Wada et al., 2003). Wenn auditive Information in beiden Intervallen enthalten ist, scheint sie sich gegenüber der visuellen durchzusetzen. Jedoch traten in den Experimenten 4 und 5, sobald das Vergleichsintervall visuell dargeboten wurde, Integrationsvorgänge auf, die am besten im Sinne der flexiblen Gewichtung nach Heron et al. (2004) sowie Wada et al. (2003) erklärt werden können. Denn die Ergebnisse von Experiment 4 geben Hinweise dafür, dass bei einem visuellen Vergleichsintervall nicht nur die dominante auditive Information des Standardintervalls, sondern die integrierte bimodale zur Zeitwahrnehmung verwendet wurde. Offensichtlich beeinflusst das Vergleichsintervall bei Diskriminationsaufgaben die Genauigkeit der Zeitwahrnehmung maßgeblich. Das legt nahe, in dem nächsten Experiment bimodale Vergleichsintervalle V_2 mit unimodalen Standardintervallen S_1 zu kombinieren. Diese sollen Durchgängen mit bimodalem Standard- und unimodalem Vergleichsintervall gegenübergestellt werden. Damit soll überprüft

werden, ob die Position des bimodalen Intervalls als Standard- oder Vergleichsintervall die Diskriminationsleistung beeinflusst. Da das Vergleichsintervall im Vergleich zum Standardintervall die unreliablere Information für die Genauigkeit liefert und die bimodale Integration bei unreliableren Durchgängen deutlicher wird, sollte es das Ergebnis beeinflussen, ob das Standard- oder das Vergleichsintervall bimodal dargeboten wurden. Es wird erwartet, dass sich bei Durchgängen mit bimodalem Vergleichsintervall ein deutlicherer Integrationsvorgang bemerkbar machen sollte. Die genauen Vorhersagen werden erneut durch die quantitative Formulierung des neuronalen Zählermodells formuliert. Damit soll auch in diesem Experiment überprüft werden, ob diese Darstellung geeignet ist, die Repräsentationen von bimodalen Intervallen als Gewichtungsvorgang abzubilden.

Obleich bisher kein Ergebnis für die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese spricht, sollen die Vorhersagen doch noch einmal kurz für den Fall formuliert werden, dass die Information getrennt voneinander in sensorischen Codes repräsentiert wird: Bei einem bimodalen Vergleichsintervall sollte sich bei kurzen Zeitdauern im Sinne der Modality Appropriateness Hypothese die auditive Modalität gegenüber der visuellen durchsetzen. Durchgänge mit einem bimodalen Vergleichsintervall sollten ebenso genau wie solche mit einem auditiven Vergleichsintervall diskriminiert werden. Bei langen Zeitdauern sollten keine modalitätsspezifischen Effekte auftreten.

Die Vorhersagen des Zählermodells wurden erneut aus den Gleichungen abgeleitet. Dabei wurden für das Vergleichsintervall die Formeln für die Beschreibung eines bimodalen Signals eingesetzt und es ergibt sich mit a und b als Parameter des bimodalen Vergleichsintervalls V_2 :

$$P \{ "C > S" \mid t_s, t_c \} = \Phi \left(\frac{\sqrt{\frac{\sigma_b^2}{\mu_b^3 \cdot \mu_a^2} + \frac{\sigma_a^2}{\mu_a^3 \cdot \mu_b^2}} \cdot t_c - \frac{t_s}{\mu_s}}{\sqrt{\frac{\sigma_a^2}{\mu_a^3} + \frac{\sigma_b^2}{\mu_b^3}}} \right) \quad (23)$$

$$\sqrt{\frac{\frac{\sigma_b^2 \cdot \sigma_a^2}{\mu_b^3 \cdot \mu_a^3} \cdot t_c + \frac{\sigma_s^2}{\mu_s^3} \cdot t_s}{\frac{\sigma_b^2}{\mu_b^3} + \frac{\sigma_a^2}{\mu_a^3}}}$$

Die Vorhersagen wurden wieder mit den gleichen Parametern wie in den vorherigen Experimenten spezifiziert. In Abbildung 17 sind die Vorhersagen für bimodal - unimodale Durchgänge mit den Vorhersagen für unimodal - bimodalem Durchgänge dargestellt. Wie in den Vorhersagen zu den anderen Experimenten dieser Arbeit ergeben sich auch hier die gleichen Muster für lange und kurze Zeitdauern. Zunächst fällt auf, dass die Kurven für bimodale Vergleichsintervalle flacher ausfallen als die für bimodale Standardintervalle. Offensichtlich wirkt sich ein bimodales Vergleichsintervall insgesamt stabilisierend auf die Diskriminationsleistung aus, da der Einfluss des unimodalen Standardintervalls nachlässt. Dies wird im Vergleich zu den Kurven mit bimodalem Standardintervall deutlich, bei denen das unimodale Vergleichsintervall die Diskriminationsleistung deutlicher beeinflusst. Außerdem drücken die Vorhersagen aus, dass bimodal - auditive Durchgänge nicht gleich wie auditiv - bimodale diskriminiert werden.

7. Experiment 6: Unimodales Standard- und bimodales Vergleichsintervall

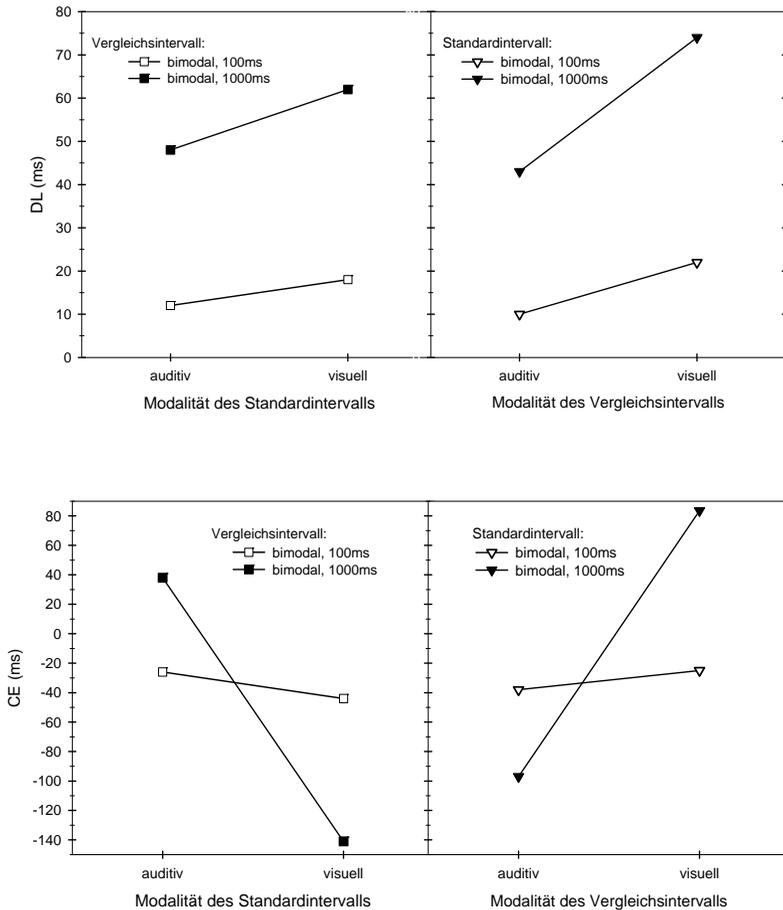


Abbildung 17: Vorhersagen des Zählermodells zu Experiment 6 für DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer, der Position des bimodalen Intervalls (Standardintervall vs. Vergleichsintervall) und der Modalität des unimodalen Intervalls (auditiv vs. visuell).

Damit führt ein bimodales Vergleichsintervall nicht dazu, dass nur die Information der auditiven Modalität für die Zeitwahrnehmung genutzt wird. Das Muster der Abbildung 17 spricht also gegen eine auditive Dominanz und für eine flexible Gewichtung der bimodalen Information.

Das Zählermodell postuliert für Experiment 6, dass die Modalität des unimodalen Intervalls die Diskriminationsleistung deutlich beeinflusst. Dieser Einfluss wird jedoch durch die Position des bimodalen Intervalls moduliert, d. h. Durchgänge mit einem unimodalen visuellen Intervall sollten genauer diskriminiert werden, wenn das Vergleichsintervall anstelle des Standardintervalls bimodal ist. Anders herum sollten Durchgänge mit einem unimodalen auditiven Intervall genauer diskriminiert werden, wenn das Standardintervall anstelle des Vergleichsintervalls bimodal ist. Laut den Vorhersagen des neuronalen Zählermodells führt ein bimodales Vergleichsintervall also dazu, dass die Information beider Modalitäten flexibel gewichtet wird. Dies zeigt sich in Abbildung 17 anschaulich an der flacheren Kurve für Durchgänge mit bimodalem Vergleichsintervall. Die Werte sprechen allerdings gegen genauere Diskriminationsleistungen bei Durchgängen mit bimodalem Vergleichsintervall im Gegensatz zu solchen mit einem bimodalen Standardintervall. Dafür scheint bei einem bimodalen Vergleichsintervall der sensorische Einfluss des unimodalen Intervalls auf die Genauigkeit deutlich nachzulassen.

Wie in den vorangegangenen Experimenten legt das Zählermodell auch in diesen Vorhersagen nahe, dass die Information beider Intervalle, des Standard- und des Vergleichsintervalls, in den Gesamtwert mit eingehen. So sollten Durchgänge mit der auditiven Information in Standard- und Ver-

gleichsintervall genauer beurteilt werden als solche, in denen die auditive Information nur im Vergleichsintervall vorhanden ist.

Die Simulationen bezüglich CE ergeben ein Muster, das sich recht einfach erklären lässt: Ein bimodales Vergleichsintervall wird länger als ein visuelles Standardintervall wahrgenommen, ein visuelles Vergleichsintervall entsprechend kürzer als ein bimodales Standardintervall. Bei auditiven Intervallen verhält sich das entsprechend umgekehrt. Demnach werden bimodale Signale länger als rein visuelle und kürzer als auditive beurteilt. Auch das spricht dafür, dass die Information bei bimodal dargebotenen Zeitintervallen gemittelt wird, und nicht nur die auditive Information zur Repräsentation der wahrgenommenen Länge zugrunde gelegt wird. Denn bei auditiver Dominanz sollte bei den Durchgängen bimodal - auditiv sowie auditiv - bimodal der CE Null betragen.

7.1 Methode

Versuchspersonen. Zwanzig Studierende, davon 16 Frauen und 4 Männer, nahmen an diesem Experiment teil. Die jüngste Versuchsperson war 19, die älteste 35 Jahre alt ($M = 23.4$, $SD = 3.84$). Alle hatten normale auditive und visuelle Fähigkeiten und nahmen unter den gleichen Bedingungen wie in den vorangegangenen Experimenten an der Studie teil.

Apparatur und Reize. Alles war identisch mit Experiment 4.

Durchführung. Das Experiment wurde in 4 Blöcke pro Standarddauer (100, 1000 ms) unterteilt, visuell - bimodal, auditiv - bimodal, bimodal - visuell, bimodal - auditiv. Es wurde ein dreifaktorielles Design mit den Faktoren Standarddauer (100 vs. 1000 ms), der Position des bimodalen

Intervalls (Standardintervall vs. Vergleichsintervall) und der Modalität des unimodalen Intervalls (auditiv vs. visuell) durchgeführt. Pro Standarddauer und Bedingung fanden 8 Trainingsdurchgänge, also insgesamt 64 Durchgänge statt, die nicht ausgewertet wurden. Jeder Block bestand aus 60 Durchgängen, damit ergaben sich für das Experiment 480 Experimentaldurchgänge. Die Durchgänge wurden nach Modalität und Standarddauer geblockt dargeboten, die Reihenfolge der Blöcke bezüglich der Kongruenzbedingungen wurde über die Versuchspersonen nach der Methode des balancierten Lateinischen Quadrats ausbalanciert.

7.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse von Experiment 6 sind in Abbildung 18 dargestellt. Erneut ergeben sich keine Hinweise für die Gültigkeit der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Dagegen stimmt das Ergebnismuster bezüglich DL gut mit dem Vorhersagemuster des neuronalen Zählermodells überein. Offensichtlich scheint die Diskriminationsleistung von der Position des bimodalen Intervalls und der Modalität des unimodalen Intervalls abzuhängen. Bezüglich CE fällt auf, dass das bimodale Standardintervall wie bereits in Experiment 5 zu einer tendenziell stabileren Repräsentation bezüglich der wahrgenommenen Länge führte. Dieser Effekt trat jedoch nicht bei Durchgängen mit einem bimodalen Vergleichsintervall auf. Insbesondere wurde ein visuelles Standardintervall deutlich kürzer als ein bimodales Vergleichsintervall beurteilt. Im Gegensatz dazu führte das auditive Standardintervall erneut zu einer stabileren Repräsentation der wahrgenommenen Länge, es wurde kaum länger als das bimodale Vergleichsintervall eingeschätzt.

7. Experiment 6: Unimodales Standard- und bimodales Vergleichsintervall

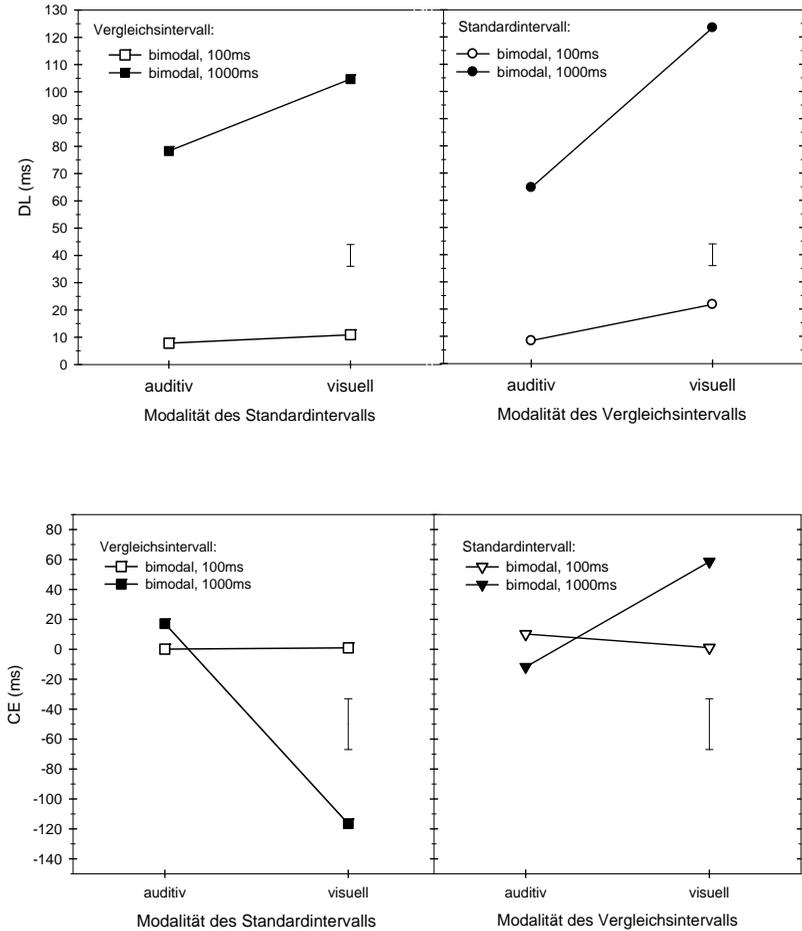


Abbildung 18: Ergebnisse zu Experiment 6 für DL und CE in Abhängigkeit von der Standarddauer, der Position des bimodalen Intervalls (Standardintervall vs. Vergleichsintervall) und der Modalität des unimodalen Intervalls (auditiv vs. visuell).

Über die Faktoren Standarddauer (100 vs. 1000 ms), Position des bimodalen Intervalls (Standardintervall vs. Vergleichsintervall) und Modalität des unimodalen Intervalls (auditiv vs. visuell) wurde eine dreifaktorielle ANOVA gerechnet.

Unterschiedsschwelle DL. Erwartungsgemäß nahm DL mit der Länge des Standardintervalls zu, $F(1,19) = 102.6$, $p < .001$. Durchgänge mit auditivem Einzelreiz wurden gemäß der Vorhersage des Zählermodells genauer diskriminiert als die mit visuellem $F(1,19) = 32.5$, $p < .001$. Dieser Effekt wurde mit zunehmender Standarddauer deutlicher, $F(1,19) = 16.5$, $p < .001$. Für die Genauigkeit war es unerheblich, ob das Standard- oder das Vergleichsintervall bimodal dargeboten wurde, $F < 1$. Theoretisch bedeutsam ist, dass die Modalität des unimodalen Intervalls von der Position des bimodalen Intervalls beeinflusst wurde, $F(1,19) = 9.0$, $p = .007$. Demnach wurden Durchgänge mit auditivem Einzelreiz genauer wahrgenommen, wenn das Standardintervall anstelle des Vergleichsintervalls bimodal dargeboten wurde. Durchgänge mit einem visuellen unimodalen Intervall wurden ungenauer wahrgenommen, wenn das Standard- anstelle des Vergleichsintervalls bimodal dargeboten wurde. Dies entspricht den Vorhersagen des Zählermodells und steht dafür, dass die sensorische Information bei Durchgängen mit bimodalem Vergleichsintervall gewichtet wird. Dieser Effekt nahm nur tendenziell mit der Standarddauer zu, $F(1,19) = 3.7$, $p = .071$. Damit ergaben sich auch aus den Ergebnissen dieses Experiments Hinweise dafür, dass Integrationsvorgänge auftreten, die durch das neuronale Zählermodell vorhergesagt werden können.

Konstanter Fehler CE. Bezüglich CE ließen sich die Vorhersagen des Zählermodells teilweise bestätigen. Die Ergebnisse ergaben, dass ein

bimodales Vergleichsintervall tendenziell länger wahrgenommen wird als ein bimodales Standardintervall, $F(1,19) = 3.6$, $p = .074$. Dieser Effekt wurde besonders dann deutlich, wenn das Standardintervall visuell war, $F(1,19) = 6.3$, $p = .021$, wie es aus Abbildung 18 hervorgeht. Das visuelle Standardintervall wurde tendenziell nur bei langen Standarddauern kürzer beurteilt, $F(1,19) = 3.2$, $p = .091$. Alle drei Faktoren beeinflussten sich gegenseitig, $F(1,19) = 7.9$, $p = .011$.

7.3 Diskussion

Sensorisch - kognitive Kodierungshypothese. Aus den Ergebnissen ergeben sich weitere Hinweise gegen die Gültigkeit der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Wie bereits in den ersten 5 Experimenten dieser Arbeit, nehmen die sensorischen Einflüsse bei langen Zeitdauern zu. Zusätzlich ergeben sich auch bezüglich kurzer Zeitdauern Hinweise gegen die Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese. Kurze sensorische Intervalle sollten dieser Hypothese zufolge in voneinander getrennten Codes repräsentiert werden und daher sollte lediglich die Information der dominanten Modalität verarbeitet werden. Die Ergebnisse des Experimentes geben jedoch Hinweise dafür, dass die Integration bimodaler Information bereits bei kurzen Zeitdauern stattfindet.

Neuronales Zählermodell. Die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells sollen zunächst bezüglich DL diskutiert werden. Analog zu den anderen Experimenten dieser Arbeit werden die Vorhersagen darin bestätigt, dass lange und kurze Zeitdauern gleichartig repräsentiert werden. Die Ergebnisse gaben Hinweise für den vorhergesagten deutlichen Einfluss der

Modalität des unimodalen Intervalls. Theoretisch bedeutsam ist hier insbesondere, dass dieser Einfluss von der Position des bimodalen Intervalls moduliert wird. Der Einfluss der Modalität des unimodalen Intervalls lässt nach, wenn das Vergleichsintervall bimodal dargeboten wird. Da das Vergleichsintervall verglichen mit dem Standardintervall den höheren Ungenauigkeitsfaktor für die Diskriminationsleistung darstellt, wurden hier deutlichere Integrationsvorgänge erwartet. Diese stellten sich ein, indem offensichtlich die sensorische Information beider Intervalle in einem Gesamturteil integriert wurde. Wie vom Zählermodell vorhergesagt, führt dies nicht zu einer Optimierung, sondern zu einer flexiblen Gewichtung der sensorischen Information für die Diskriminationsleistung. Dies zeigt sich an dem Verlauf der Kurven von Abbildung 18, indem die Werte der Durchgänge mit bimodalem Vergleichsintervall innerhalb des Bereiches von den Werten der Durchgänge mit bimodalem Standardintervall liegen. Dieser Verlauf war ebenfalls vorhergesagt worden. Die Ergebnisse von Experiment 6 bestätigen somit auch die Literaturbefunde, wonach die bimodale Integration umso deutlicher wird, je unrelabler sensorische Information für eine Wahrnehmungsleistung ist (Heron et al., 2004; Van Beers et al., 2002; Wada et al., 2003).

Bezüglich CE bestätigten sich die Vorhersagen teilweise, wobei sich die vorhergesagten Richtungen experimentell bestätigen ließen. Die Effekte traten für Durchgänge mit visuellem unimodalem Intervall deutlicher als für solche mit auditivem unimodalem Intervall auf. Damit werden die Befunde der Experimente 4 und 5 repliziert, wonach eine Kombination bimodal - auditiv wohl zu einer stabileren Repräsentation bezüglich der wahrgenommenen Länge führt, d. h. der konstante Fehler fällt deutlich geringer aus als

bei einem bimodal - visuellen Durchgang. Dieser Trend tritt auch bei einem bimodalen Vergleichsintervall auf, da auch hier die Kombination auditiv - bimodal zu geringeren Werten von CE führt. Nach den Ergebnissen aller Experimente ist es wahrscheinlich, dass der Einfluss der bimodalen Information bezüglich DL und CE unterschiedlich wirkt.

Zusammenfassung. Die quantitativen Vorhersagen des Zählermodells erwiesen sich insgesamt als gut geeignet, die Vorgänge bei der Zeitdiskrimination abzubilden. Es ergeben sich Hinweise dafür, dass die Formulierung über Wahrscheinlichkeitsdichten geeignet ist, die Repräsentation sensorischer Information bei der Zeitwahrnehmung abzubilden. Bereits nach diesen ersten Untersuchungen wird deutlich, welche Möglichkeiten die quantitative Formulierung des Zählermodells aufzeigt. Seine Stärke liegt darin, dass es die sensorische Information über Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreibt, und dadurch Verknüpfungen dieser ermöglicht. Aus diesen Verknüpfungen lassen sich bezüglich DL und CE gute Vorhersagen ableiten, die sich auf die Modalität und die Position der Intervalle beziehen. Damit spricht dieses sechste Experiment erneut für eine Kernaussage des neuronalen Zählermodells, wonach sich die sensorische Repräsentation von Zeitdauern über Wahrscheinlichkeitsdichten darstellen und simulieren lässt. Mit diesem Ansatz lassen sich Vorgänge, die bei der Zeitverarbeitung auftreten, aus einer ganz neuen Sicht beschreiben und, was bisher kaum möglich war, weitere Forschungshypothesen zum Einfluss der Modalitäten auf die Zeitwahrnehmung aufstellen.

8. Allgemeine Diskussion

Diese Arbeit sollte einen Beitrag zu der Frage leisten, wie sich die Vorgänge, die bei der Zeitwahrnehmung im Millisekundenbereich von auditiven und visuellen Intervallen auftreten, abbilden lassen. Da es kein spezifisches Sinnesorgan gibt, das die Zeit misst, wird die Zeit anhand eines Ereignisses, das die Zeitdauer bestimmt, wahrgenommen. Damit ist die Zeitwahrnehmung an die Beschaffenheit des Intervalls gebunden, das sozusagen als Information die Zeitdauer trägt. In dieser Arbeit wurde der Einfluss der sensorischen Beschaffenheit eines Intervalls, der auditiven und der visuellen Modalität, auf die Zeitwahrnehmung untersucht. Obgleich die sensorischen Einflüsse auf die Zeitwahrnehmung seit langem untersucht werden (zusammenfassend z.B. Grondin, 2001), gelang es jedoch nur sehr eingeschränkt, ein Modell zu entwickeln, das die Vorgänge beschreibt, die sich bei Zeitdiskriminationsaufgaben von intermodalen auditiven und visuellen Intervallen abspielen. In dieser Arbeit wurden zwei Modelle, die den modalitätsspezifischen Einfluss auf die Zeitwahrnehmung abbilden, einander gegenübergestellt.

Das erste Modell wird durch die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese beschrieben. Sie postuliert, dass Zeitdauern als relativ stabile Codes repräsentiert werden. Diese entstehen jedoch für lange und kurze Zeitdauern über unterschiedliche Prozesse. Die sensorischen Einflüsse, die in dieser Arbeit interessieren, sollten sich nur bei der Vermittlung kurzer Zeitdauern bemerkbar machen, da nur letztere über die kurzen auditiven bzw. visuellen Speicher verarbeitet werden. Diese Speicherorganisation besteht aus modalitätsspezifischen Kanälen, die keinerlei Verbindungen

zueinander haben (Cowan, 1984; 1988). Damit werden kurze auditive und visuelle Zeitdauern über modalitätsspezifische und getrennte Codes vermittelt. Daraus sollte sich bei unimodalen auditiven und visuellen Intervallen ein Verarbeitungsvorteil von kongruenten im Gegensatz zu inkongruenten Intervallen ergeben. Bei bimodalen Intervallen, die zugleich mit der auditiven und visuellen Modalität dargeboten werden, kommt es aufgrund der getrennten Verarbeitung zu einem Wahrnehmungskonflikt. Dieser sollte zugunsten der dominanten Modalität, die über die genauere Information verfügt, gelöst werden. Daher sollten bimodal dargebotene Intervalle ähnlich wie auditive wahrgenommen werden. Ganz anders sieht die Repräsentation langer Zeitdauern aus, die amodal unter Zuhilfenahme kognitiver Prozesse erfolgen sollte. Lange Zeitdauern werden in festen Größen oder Codes repräsentiert werden, die im Gegensatz zu den Codes von kurzen Zeitdauern weitgehend unabhängig von sensorischen Einflüssen sein sollten (Cowan, 1984; 1988). Daher sollte die Modalität bei langen Intervallen die Diskriminationsleistung generell verhältnismäßig wenig beeinflussen. Bei langen wie bei kurzen Zeitdauern wird der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zufolge ein Vergleich von zwei Zeitdauern durchgeführt, indem eine Differenz der beiden Größenverhältnisse, die die Zeitdauern repräsentieren, gebildet wird. Damit sollte die Reihenfolge, in der die Intervalle dargeboten werden, das Urteil nicht beeinflussen.

Die zweite Hypothese dieser Arbeit leitet sich aus dem Zählermodell nach Creelman (1962) sowie seiner Verallgemeinerung durch Rammsayer und Ulrich (2001) ab. Es postuliert, dass lange und kurze Zeitdauern über kognitiv gezählte Pulse, die ein Generator erzeugt, repräsentiert werden. Ein Unterschied zur sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese besteht darin,

dass diesem Modell zufolge lange und kurze Zeitdauern über einen gleichartigen Prozess vermittelt werden, der sensorischen Einflüssen unterliegt. Das generalisierte Zählermodell nimmt weiterhin an, dass die Pulse sich nicht als rein numerische Größen, sondern als voneinander unabhängige Ereignisse in Verteilungsfunktionen beschreiben lassen (Rammsayer & Ulrich, 2001; Ulrich et al., 2006a). Damit gehen neben der Anzahl auch die Varianz bzw. die Reliabilität der akkumulierten Pulse mit in die Repräsentation einer Zeitdauer ein. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Charakteristika der auditiven und der visuellen Modalität auf die Zeitwahrnehmung berücksichtigt werden, indem für beide Modalitäten unterschiedliche Verteilungsfunktionen, die die entsprechende Pulsanzahl sowie die Streuung berücksichtigen, zugrunde gelegt werden. Damit erlaubt das neuronale Zählermodell eine ganz andere Perspektive, um Hypothesen für die Ergebnisse von Zeitdiskriminationsaufgaben aufzustellen. Denn während die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese die Vorhersagen für Zeitdiskriminationsaufgaben aus dem Vergleich bzw. der Differenz zweier Zeiteinheiten ableitete, basieren die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells aus der Differenz zweier Verteilungsfunktionen. Damit kann das Zählermodell Vorhersagen machen, die die Reihenfolge berücksichtigt, in der die Modalitäten in einer Zeitdiskriminationsaufgabe dargeboten werden. Ein weiterer interessanter Aspekt dieser Darstellung ergibt sich daraus, dass bimodale Intervalle abgebildet werden können, indem die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der auditiven und visuellen Modalität in einem Intervall miteinander integriert werden.

Zusammenfassend geht es also um die Frage, wie sich sensorische Einflüsse auf die Repräsentation von Zeitdauern abbilden lassen. Die Expe-

rimente sollten verdeutlichen, ob kurze Zeitdauern über getrennte modalitätsspezifische Codes in Form von bestimmten Zeiteinheiten repräsentiert werden, lange hingegen amodal verarbeitet werden, wie die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese postuliert. Die Alternativhypothese, das neuronale Zählermodell, geht davon aus, dass kurze und lange Zeitdauern gleichartig verarbeitet werden. Die sensorische Information sollte dabei über Verteilungsfunktionen abgebildet und bereits in einem frühen Stadium der Verarbeitung zu einer modalitätenunabhängigen Gesamtrepräsentation integriert werden.

8.1 Diskussion der Experimente

In Abbildung 19 sind die experimentellen Bedingungen, die Vorhersagen der beiden Hypothesen für DL sowie die Ergebnisse der Experimente einander gegenübergestellt. Darin ist deutlich zu sehen, dass die experimentellen Bedingungen so manipuliert wurden, dass sich die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese nur in einem Punkt änderten: Sie sind bei unimodaler Präsentation der Intervalle anders als bei bimodaler. Dagegen reagieren die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells insgesamt sehr sensitiv auf Änderungen im Experimentalablauf. Im Folgenden sollen die Experimente im Einzelnen diskutiert werden.

Experimentelle Bedingung	Vorhersagen sensorisch - kognitive Kodierungshyp.: Kurze Intervalle werden voneinander unabhängig repräsentiert	Vorhersagen neuronales Zählermodell: Jede Modalität wird über eine spezifische Verteilungsfunktion repräsentiert	Ergebnisse der Experimente
Kongruente vs. inkongruente Durchgänge (Exp 1, Exp 2)	Kurze Zeitdauern: ➤ inkongruente gleichartig und ungenauer als kongruente diskriminiert Lange Zeitdauern: ➤ kein Unterschied kongruent - inkongruent	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ inkongruente tendenziell ungenauer diskriminiert ➤ Kongruenz moduliert von Modalität des S_1	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ inkongruente tendenziell ungenauer diskriminiert ➤ Kongruenz moduliert von Modalität des S_1
Umkehr der Abfolge der Intervalle in $V_1 - S_2$ (Exp 3)	Kurze Zeitdauern: ➤ inkongruente gleichartig sowie ungenauer als kongruente diskriminiert Lange Zeitdauern: ➤ kein Unterschied kongruent - inkongruent	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ höchstens tendenzieller Effekt der Kongruenz ➤ deutlicher Einfluss der Modalität V_1 ➤ Wechselwirkung von V_1 und Kongruenz	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ inkongruente deutlich schlechter als kongruente diskriminiert ➤ deutlicher Einfluss der Modalität V_1 ➤ keine Wechselwirkung
Bimodales vs. unimodales S_1 , unimodales V_2 (Exp 4)	Kurze Zeitdauern: ➤ auditive Dominanz ➤ bimodale Intervalle werden zumindest ähnlich wie auditive repräsentiert Lange Zeitdauern: ➤ kein Einfluss	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ Durchgänge mit bimodalem S_1 werden tendenziell genauer diskriminiert ➤ deutlicher Einfluss des unimodalen V_2	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ keine generelle Verbesserung durch bimodale Darbietung ➤ deutlicher Einfluss des unimodalen V_2
Bimodales S_1 , uni- und bimodales V_2 (Exp 5)	Kurze Zeitdauern: ➤ auditive Dominanz ➤ bimodale Intervalle werden zumindest ähnlich wie auditive repräsentiert ➤ bimodal – visuelle Durchgänge werden wie inkongruente ungenauer diskriminiert Lange Zeitdauern: s.o.	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ Durchgänge mit auditiven und bimodalen Intervallen werden gleichartig diskriminiert. ➤ Durchgänge mit einem visuellen V_2 werden deutlich ungenauer diskriminiert	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ Durchgänge mit auditiven und bimodalen Intervallen werden gleichartig diskriminiert. ➤ Durchgänge mit einem visuellen V_2 werden deutlich ungenauer diskriminiert
Unimodales S_1 bimodales V_2 vs. bimodales S_1 unimodales V_2 (Exp 6)	Kurze Zeitdauern: ➤ Durchgänge mit auditiven und bimodalen Intervallen werden gleichartig diskriminiert Lange Zeitdauern: s.o.	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ Einfluss der Modalität S_1 bei bimodalem Vergleichsintervall geringer als Einfluss V_2 bei bimodalem S_1	Kurze und lange Zeitdauern: ➤ Einfluss der Modalität S_1 bei bimodalen Vergleichsintervall geringer als Einfluss V_2 bei bimodalem S_1

Abbildung 19: Vergleich der Vorhersagen der Hypothesen bezüglich der Diskriminationsleistung mit den Ergebnissen der Experimente

In *Experiment 1* wurden die Vorhersagen der beiden Hypothesen grundsätzlich einander gegenüber gestellt. Es sollte überprüft werden, ob sich nur die Vermittlung kurzer Zeitdauern durch die Modalitäten beeinflussen lässt, oder ob die Verarbeitung beider Zeitdauern gleichartig von den Modalitäten moduliert wird. Bezüglich kurzer Zeitdauern sollte untersucht werden, ob die sensorische Information von kurzen Zeitdauern über getrennte Kodes erfolgt oder relativ früh integriert wird. Dazu wurden in diesem Experiment kongruente Durchgänge inkongruenten gegenübergestellt. Wenn die Vermittlung der Intervalle nach der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese über modalitätsspezifische Kodes erfolgt, sollte sich ein klarer Verarbeitungsvorteil für kongruente Durchgänge ergeben. Erwartet wurde, dass kongruente auditive Durchgänge etwas genauer diskriminiert werden als kongruente visuelle, inkongruente Durchgänge sollten insgesamt deutlich ungenauer diskriminiert werden. Die Reihenfolge der Modalitäten bei der Darbietung sollte das Ergebnis nicht beeinflussen. Bei langen Zeitdauern sollte der modalitätsspezifische Einfluss verschwinden. Dagegen ergaben die aus dem generalisierten Zählermodell abgeleiteten und formulierten Vorhersagen keinen Unterschied zwischen langen und kurzen Zeitdauern. Außerdem sollten kongruente Durchgänge im Vergleich zu inkongruenten geringfügig besser verarbeitet werden. Theoretisch bedeutender ist jedoch, dass ein Reihenfolgeeffekt postuliert wurde, wonach Durchgänge mit einem auditiven Vergleichsintervall immer besser als solche mit einem visuellen diskriminiert werden sollten. Dies sollte für kongruente und, im Gegensatz zur sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese, auch für inkongruente Durchgänge gelten. Die Ergebnisse des ersten Experimentes ergaben ein Muster, das weitgehend den Vorhersagen des

neuronalen Zählermodells entsprach: Offensichtlich werden beide Zeitdauern gleichartig verarbeitet. Außerdem wurden Durchgänge mit einem visuellen Vergleichsintervall schlechter diskriminiert als solche mit einem auditiven. Während dies bei kongruenten Durchgängen aufgrund der Literaturbefunde zu erwarten war (z. B. Grondin, 2001), wurde dieser Befund bei inkongruenten Durchgängen bisher meines Wissens noch nie derart deutlich vorhergesagt, jedoch gelegentlich gefunden (z. B. Wearden et al., 1998). Damit lieferte das Ergebnismuster Hinweise für die Gültigkeit des generalisierten Zählermodells und ergab wenig Evidenz für die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese (siehe auch Rammsayer & Ulrich, 2006; Ulrich et al., 2006a).

In einem *zweiten Experiment* sollten mögliche Strategien bei der Versuchsdurchführung durch eine geblockte Darbietung verringert werden. Die Vorhersagen blieben dieselben wie im ersten Experiment. Die Ergebnisse replizierten die des ersten Experimentes: Erneut ergab sich für beide Zeitdauern, dass sich Durchgänge mit einem visuellen Vergleichsintervall schlechter diskriminieren ließen als mit einem auditiven. Offensichtlich ist das Ergebnismuster recht stabil. Da es vom generalisierten Zählermodell vorhergesagt worden war, ergeben sich erneut Hinweise dafür, dass das Zählermodell in der Lage ist, durch die Formulierung von Verteilungsfunktionen einen bislang wenig beachteten Reihenfolgeeffekt bezüglich der dargebotenen Modalitäten zu berücksichtigen.

Im *dritten Experiment* sollte die Möglichkeit ausgeschlossen werden, dass ein Strategiefehler der Versuchspersonen die Ergebnisse beeinflusst hatte. Möglicherweise hatten sie ihre Aufmerksamkeit auf das zweite, variable Intervall V_2 gelenkt. Aus diesem Grund wurde im dritten Experiment

die Reihenfolge der Darbietung von $S_1 - V_2$ in $V_1 - S_2$ geändert. Die Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese änderten sich durch diese Manipulation nicht. Dagegen ergaben die Vorhersagen des Zählermodells, dass sich nun die Diskriminationsleistungen bei inkongruenten Durchgängen umdrehen sollten, d. h. die kongruenten Durchgänge mit der Intervallfolge auditiv - auditiv sollten nach wie vor genauer als visuell - visuell diskriminiert werden, jedoch sollten nun inkongruente Durchgänge mit der Modalitätenfolge auditiv - visuell genauer als visuell - auditiv diskriminiert werden. Im Gegensatz zu den ersten beiden Experimenten sollte sich nun die Modalität des V_1 bei kongruenten stärker als bei inkongruenten Durchgängen auswirken. Die Ergebnisse ergaben erneut ein Muster, das bei kurzen, entgegen den Vorhersagen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese jedoch auch bei langen Zeitdauern auftrat. Theoretisch bedeutsam ist, dass die etwas kontraintuitive Vorhersage des Zählermodells bestätigt wurde, indem sich die Diskriminationsleistungen bei inkongruenten Durchgängen bezüglich DL und CE im Vergleich mit den ersten beiden Experimenten umdrehten. Dies liefert weitere Anhaltspunkte dafür, dass sich die Repräsentation von auditiven und visuellen Zeitdauern über Wahrscheinlichkeitsverteilungen abbilden lässt. Andererseits überraschten zwei Aspekte der Ergebnisse: Zum einen ergab sich ein deutlicher Kongruenzeffekt, wonach inkongruente Durchgänge bei beiden Zeitdauern erheblich schlechter diskriminiert wurden als kongruente. Zusätzlich verschlechterte sich die Diskriminationsleistung in diesem dritten Experiment über alle Bedingungen hinweg deutlich (siehe auch Ulrich et al., 2006a). Keine der beiden Arbeitshypothesen ist in der Lage, eine Erklärung dafür zu liefern.

Möglicherweise überlagern sich an dieser Stelle mehrere Effekte, die weiterer Forschung bedürfen.

Bisher erfolgte die Gegenüberstellung der beiden Hypothesen über kongruente vs. inkongruente Durchgänge, wobei die einzelnen Intervalle unimodal dargeboten wurden. Um aus einer anderen Perspektive zu überprüfen, ob die sensorische Information der Zeitdauern zunächst modalitätsspezifisch getrennt oder kombiniert vermittelt wird, bietet es sich an, bimodale Intervalle zu verwenden. Dazu wurde das *vierte Experiment* durchgeführt. Wenn Zeitdauern gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zunächst über modalitätsspezifische getrennte Speicher vermittelt werden, so sollte zumindest bei kurzen Zeitdauern die Information der dominanten auditiven Modalität die Genauigkeit der Zeitdiskrimination bestimmen. Wird jedoch die sensorische Information zu einer modalitätsspezifischen Größe integriert, wie es das neuronale Zählermodell annimmt, so sollte sich eine Optimierung im Sinne einer Verbesserung der Diskriminationsleistung gegenüber rein unimodalen Durchgängen bemerkbar machen. Um dies zu überprüfen, wurden in Experiment 4 Durchgänge mit bimodalem Standardintervall solchen mit unimodalem Standardintervall gegenübergestellt. Das Vergleichsintervall war immer auditiv oder visuell. Die Ergebnisse ergaben, dass sich für Durchgänge mit visuellem Vergleichsintervall ein Integrationseffekt ergab, und sprachen somit gegen die alleinige Verarbeitung auditiver Information. Damit lieferten sie deutliche Hinweise für eine frühe Integration beider Modalitäten, die bereits bei kurzen Zeitdauern beginnt. Allerdings trat dieser Effekt bei Durchgängen mit auditivem Vergleichsintervall nicht auf. Ebenso wenig ergaben sich Hinweise für eine gegenüber der unimodalen Darbietung deutlichen Varianzre-

duzierung durch bimodale Intervalle nach z. B. Gepshtein et al. (2003; 2005).

Da die Optimierung nicht in dem erwarteten Maß ausfiel, wurde in einem *fünften Experiment* untersucht, ob bimodal - bimodale Durchgänge zu einer weiteren Verbesserung der Diskriminationsleistung führen. Dies wurde nicht vom Zählermodell vorhergesagt und ergab sich auch nicht als Ergebnis. Jedoch befinden sich die Ergebnisse in Einklang mit Literaturbefunden zur flexiblen Gewichtung bei der bimodalen Integration. Denn es existieren Befunde, wonach eine bimodale Integration dann eintritt, wenn die dominante Modalität unreliable Information liefert (Heron et al., 2004; Van Beers et al., 2002; Wada et al., 2003). Da dies nicht der Fall ist, wenn Standard- und Vergleichsintervall bimodal dargeboten werden, ergaben sich keine weiteren Vorteile durch die bimodal - bimodale Darbietung für die Zeitwahrnehmung.

In einem letzten *Experiment 6* sollten Durchgänge mit bimodalem Vergleichs- und unimodalem Standardintervall verwendet werden. Die vorangegangenen Experimente hatten Hinweise dafür ergeben, dass sich insbesondere ein visuelles Vergleichsintervall nachteilig auf die Genauigkeit der Zeitwahrnehmung auswirkt und so eine unreliable Information für die Beurteilung liefert. Da die bimodale Integration in der Literatur in einigen Arbeiten nur für den Fall beobachtet wurde, wenn die sensorische Information einer Wahrnehmungsleistung unreliabler wird (Heron et al., 2004; Wada et al., 2003), wurden in einem letzten Experiment Durchgänge mit bimodalem Vergleichs- und unimodalem Standardintervall verwendet, die Durchgängen mit bimodalem Standard- und unimodalem Vergleichsintervall gegenübergestellt wurden. Wenn nun die modalitätsspezifische In-

formation gemäß der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese bei kurzen Intervallen in getrennten Kanälen vermittelt wird (Cowan, 1997), sollte bei bimodalem Vergleichsintervall lediglich die auditive Information berücksichtigt werden. Dadurch sollten Durchgänge mit bimodalem Vergleichsintervall so genau wie solche mit einem auditiven Vergleichsintervall beurteilt werden können. Dagegen ergaben die Vorhersagen des generalisierten Zählermodells ein anderes Muster. Danach sollte die bimodale Information des Vergleichsintervalls den Einfluss der Modalität des unimodalen Standardintervalls auf die Diskriminationsleistungen deutlich verringern, während bei bimodal - unimodalen Durchgängen die Modalität des unimodalen Vergleichsintervalls die Diskriminationsleistung klar moduliert. Mit anderen Worten sollte die sensorische Information beider Intervalle dann stärker integriert werden, wenn das Vergleichsintervall anstelle des Standardintervalls bimodal präsentiert wird. Die Ergebnisse bestätigten die Vorhersagen des Zählermodells erstaunlich gut und ergaben deutliche Hinweise für eine flexible Integration der sensorischen Information bei der Zeitwahrnehmung. Eine Optimierung im Sinne einer absoluten Verbesserung (Bresciani et al., 2006; Ernst & Banks, 2002; Gepshtein et al., 2003; 2005) trat jedoch entsprechend der Vorhersage nicht ein. Die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese wurde in zweierlei Hinsicht nicht bestätigt: Erstens wurde auch die Wahrnehmung langer Zeitdauern analog zu der von kurzen durch die Modalitäten beeinflusst. Zweitens scheint die sensorische Information kurzer Zeitdauern nicht in getrennten sensorischen Kanälen vermittelt zu werden, sondern wird offensichtlich relativ früh zu einer modalitätenunspezifischen Größe integriert.

Zusammenfassung der Experimente. Insgesamt sprechen die Ergebnisse dafür, dass die sensorische Information aus unterschiedlichen Kanälen bei der Zeitwahrnehmung in einem relativ frühen Stadium integriert wird. Dies scheint für kurze und lange Zeitdauern gleichermaßen zu erfolgen. Damit ergaben sich zahlreiche Hinweise dafür, dass die Annahmen des generalisierten Zählermodells geeignet sind, die Vorgänge abzubilden, die bei der Vermittlung von Zeitdauern auftreten. Dies zeigte sich bei unimodal dargebotenen Intervallen sowohl bezüglich der Reihenfolge der Modalitäten als auch bezüglich der Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall. Bei bimodalen Intervallen ergab sich zusätzlich zum vorhergesagten Reihenfolgeeffekt, dass die bimodale Information integriert wird, sobald die Darbietung unreliable Information liefert und durch die bimodale Information ein Reliabilitätsgewinn der Wahrnehmung erzielt wird.

8.2 Diskussion einzelner Aspekte der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese

Ogleich die Befunde gegen die Annahmen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese sprechen, wird sie doch in neuerer Zeit immer wieder aufgegriffen (z. B. Rammsayer & Brandler, 2004, Rammsayer & Ulrich, 2005).

Amodale Verarbeitung langer Zeitdauern. Insgesamt konnte nicht nachgewiesen werden, dass lange Zeitdauern amodal verarbeitet werden; in allen Experimenten wurden die sensorischen Einflüsse bei langen Intervallen tendenziell eher deutlicher. Möglicherweise müssen zur kognitiven Verarbeitung von langen Zeitdauern diese Mechanismen und damit die

perzeptferne Kodierung durch weitere, kognitive oder Aufmerksamkeitsprozesse zusätzlich aktiviert werden. Grondin, Meilleur-Wells und Lachance (1999) berichten in ihren Experimenten, dass aktives Zählen ab einer bestimmten Zeitdauer die Zeitschätzung verbesserte. Möglicherweise setzten die Versuchspersonen beim Zählen kognitive Prozesse ein, die die Verarbeitung insbesondere langer Intervalle unterstützten. Vielleicht erfolgt die Zeitverarbeitung besonders dann über amodale kognitive Prozesse, wenn die Versuchspersonen eine kognitive Nebenaufgabe durchführen. Damit orientieren sich die Versuchspersonen bei der Zeitbeurteilung möglicherweise an der Ereignisdauer der kognitiven Aufgabe. Diese Vermutung stimmt mit dem Modell von Cowan (1997) insofern überein, dass die Verarbeitung im langen sensorischen Speicher, die perzeptfern verläuft, auch nichtsensorische Bereiche des Langzeitgedächtnisses aktivieren kann. Es wäre nun interessant, auch bei intermodalen Diskriminationsaufgaben gezielt zu überprüfen, wie Manipulationen der Aufmerksamkeit, z. B. durch Zählen, auf die Diskriminationsleistung wirken. Gemäß der sensorisch-kognitiven Kodierungshypothese sollte sich bei kurzen Intervallen in jedem Fall ein Kongruenzeffekt einstellen. Bei langen Intervallen sollte sich dann ein Kongruenzeffekt ergeben, wenn die Aufmerksamkeit nur auf die sensorische Information der Intervalle gerichtet ist, jedoch nicht, falls andere nichtsensorische kognitive Prozesse aktiviert werden. Es wurde vermutet, dass ein solcher möglicherweise störender Einfluss möglicherweise durch den Aufmerksamkeitswechsel bei der inkongruenten Darbietung entstand. Er sollte durch die bimodale Darbietung ausgeschlossen werden, jedoch führten auch die Experimente 4, 5 und 6 bezüglich langer Zeitdauern zu keinem Ergebnis, das auf eine amodale Verarbeitung schließen lassen könn-

te. Offensichtlich werden lange Intervalle bezüglich ihres sensorischen Informationsgehaltes gleichartig wie kurze verarbeitet. Zu diesem Schluss kamen auch Rammsayer und Ulrich (2005) in mehreren Experimenten.

Modalitätsspezifische Vermittlung kurzer Zeitdauern. Kurze Zeitdauern sollten der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese zufolge über getrennte modalitätsspezifische Kanäle erfolgen. Während dieses Prozesses sollten keine Verbindungen zwischen den Kanälen möglich sein (Cowan, 1997), also auch keine Integration der Information. Daraus folgt für die bimodale Verarbeitung, dass bei kurzen Zeitdauern nur die Information einer Modalität für das Urteil berücksichtigt werden kann, wie es die Modality Appropriateness Hypothese formuliert (Welch et al., 1986). Zahlreiche Literaturbefunde sprechen dafür, dass für die Zeitwahrnehmung die auditive Modalität die dominante Information vermittelt. Sie wird auch dann für das Urteil zugrunde gelegt, wenn die Zeitdauer zusätzlich in einer zweiten Modalität dargeboten wird (Walker & Scott, 1981). Diese Annahme, wonach bimodale Intervalle wie auditive verarbeitet werden, konnte nur teilweise bestätigt werden. Offensichtlich gilt sie dann, wenn die auditive Information für die Zeitwahrnehmung hinreichend reliabel ist, so dass die visuelle Modalität keine zusätzliche Information liefert, wie es auch vielfach in der Literatur berichtet wird (z. B. Wada et al., 2003). Auch die Ergebnisse der Experimente 4 und 5 geben dafür Hinweise. Wenn das Standardintervall (Experiment 4) bzw. beide Intervalle (Experiment 5) bimodal dargeboten wurden, wurden die Durchgänge wie unimodale auditive beurteilt. Allerdings galt das nur bei Durchgängen, in denen das Vergleichsintervall ebenfalls auditiv oder bimodal war. War das Vergleichsintervall visuell, so fiel das Ergebnismuster anders aus. Offensichtlich wird die unre-

liablere Information anders verarbeitet. Darauf soll in der Diskussion des neuronalen Zählermodells weiter eingegangen werden.

Repräsentation von Zeitdauern über feste Zeitgrößen. Eine weitere Annahme der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese besteht darin, dass die Intervalle über bestimmte Zeitgrößen, wie eine kognitiv akkumulierte Pulsanzahl oder eine Kriteriumszeitdauer repräsentiert werden. Als Folge davon sollten bei einer Diskrimination die beiden Größen voneinander abgezogen werden (Carbotte & Kristofferson, 1971; Creelman, 1962; zusammenfassend Rammsayer, 1992). Wenn Zeitdauern in dieser Weise repräsentiert werden, sollten inkongruente Durchgänge gleichartig diskriminiert werden. Es dürften sich keine Reihenfolgeeffekte einstellen, weder bezüglich der Position eines bimodalen Intervalls (z. B. bimodal - visuell vs. visuell - bimodal), noch bezüglich der Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall ($V_1 - S_2$ vs. $S_2 - V_1$). Die Ergebnisse der Experimente bestätigten diese Annahmen nicht. Offensichtlich ist die Abbildung in numerischen Zeiteinheiten nicht geeignet, die Repräsentation von intermodalen Zeitdauern abzubilden.

8.3 Diskussion einzelner Aspekte des generalisierten Zählermodells

Die Ergebnisse der Experimente bestätigten im Wesentlichen die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells. Da zumindest vorläufig noch keine Parameterwerte für das neuronale Zählermodell existieren, die quantitative Aussagen ermöglichen, können lediglich die qualitativen Vorhersagen den Ergebnissen gegenübergestellt werden. Im Folgenden soll das Zähler-

modell in den einzelnen Aspekten, die sich aus seinen Annahmen ableiten, diskutiert werden.

Vermittlung langer und kurzer Zeitdauern. Ein oder zwei Mechanismen? Ein übergeordneter zentraler Unterschied zwischen den beiden Hypothesen dieser Arbeit bezog sich darauf, ob im Millisekundenbereich ein oder zwei Mechanismen zur Zeitverarbeitung vorliegen. Speziell wurde untersucht, ob sich die beiden Mechanismen diskriminieren lassen oder nicht. Die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells hatten entgegen denen der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese ergeben, dass die Verarbeitung langer und kurzer Zeitdauern gleichartig erfolgen sollte. Die Ergebnismuster verlaufen über alle Experimente hinweg für lange und kurze Zeitdauern nahezu identisch und bestätigen damit die Annahmen des Zählermodells. Dies gibt Hinweise dafür, dass die Verarbeitung langer und kurzer Zeitdauern von sensorischen Informationen gleichartig beeinflusst wird (Rammsayer & Ulrich, 2005; Ulrich et al., 2006a).

Reihenfolge der Modalitäten bei der Darbietung. Im Gegensatz zu der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese macht das Zählermodell klare Vorhersagen zu dem Einfluss der Abfolge, in der die Intervalle dargeboten werden. Dies betrifft die Abfolge der Modalitäten und die Abfolge Standard- und Vergleichsintervall. Zunächst soll die Abfolge der Modalitäten betrachtet werden. Wenn das Standardintervall an erster Position dargeboten wird, also $S_1 - V_2$, so sollten den Vorhersagen zufolge grundsätzlich Durchgänge mit einem visuellen Vergleichsintervall ungenauer diskriminiert werden als solche mit einem auditiven. Diese Vorhersagen des Zählermodells bezüglich der Reihenfolge der Modalitäten ließen sich erstaunlich gut bestätigen, und zwar bezüglich unimodaler und bimodaler Durch-

gänge. Dieser Reihenfolgeeffekt lässt sich nur durch die Annahme des Zählermodells, dass sich die Repräsentationen von Zeitdauern über Verteilungsfunktionen abbilden lassen, darstellen. Dies ist bisher in der Literatur ein wenig untersuchtes Gebiet. Eine der wenigen Arbeiten, die für auditive und visuelle Intervalle neben einer unterschiedlichen Pulsanzahl auch eine unterschiedliche Variabilität bei der Verarbeitung untersuchte, ist die Arbeit von Penney et al., (2000). Die Autoren gingen von einem kognitiven Zähl- und Akkumulationsprozess aus, wodurch die Zeitdauern in Pulsanzahlen repräsentiert werden sollten. Anschließend, so die Autoren, sollten die Zeitdauern über ein Gedächtnis repräsentiert werden, in dem auditive Information mit geringerer Variabilität gespeichert werden sollte als visuelle. Die Autoren untersuchten allerdings relativ lange Zeitdauern im Bereich von 3 – 12 Sekunden und maßen die wahrgenommene Länge, nicht jedoch die Genauigkeit der Zeitwahrnehmung. Ihr Modell kann zwar kongruenzbedingte Unterschiede erklären, es macht allerdings keine Aussage zu dem in dieser Arbeit gefundenen Reihenfolgeeffekt. Wearden et al. (1998) beobachteten mit einer anderen Methode zur Zeitwahrnehmung, dass visuelle Intervalle mit einer größeren Streuung oder Ungenauigkeit wahrgenommen werden als auditive. Die Autoren fanden auch, dass die Reihenfolge visuelles Standard- und auditives Vergleichsintervall genauer wahrgenommen wird als die umgekehrte Reihenfolge. Obgleich sie die Möglichkeit ansprechen, dass die Variabilität durch die unterschiedliche Pulsrate des Zählers für auditive und visuelle Intervalle herrührt, verlagern die Autoren die Komponente, die die Streuung verursacht, in einen dem Zähler nachgelagerten Schalter. Diese Schalter sollten durch die vergleichsweise variablen On- und Offsetzeiten von visuellen im Vergleich zu auditiven Intervallen

entsprechend ungenauer öffnen und schließen. Während es Wearden et al. (1998) in ihrer Arbeit eher darum ging, Modellkomponenten zur Zeitwahrnehmung zu differenzieren, liegt das Ziel der vorliegenden Arbeit mehr darin, eine Form zu finden, mit der die Repräsentationen von Zeitdauern abgebildet werden. Bemerkenswert ist dabei, dass Wearden et al. (1998) mit einer anderen Methode zu ähnlichen Ergebnissen kommen.

Reihenfolge der Intervalle $S_1 - V_2$ vs. $V_1 - S_2$. Eine zweite interessante und kontraintuitive Aussage des neuronalen Zählermodells besteht darin, dass es, sobald die Abfolge von Standard- und Vergleichsintervall in $V_1 - S_2$ umgedreht wird und das Standardintervall dem Vergleichsintervall folgt, bezüglich inkongruenter Durchgänge andere Vorhersagen als zu $S_1 - V_2$ macht. Während das Zählermodell bei der Abfolge $S_1 - V_2$ postuliert, dass die Modalität des V_2 die Kongruenz beeinflusst, dreht sich die Vorhersage bei der Abfolge $V_1 - S_2$ gewissermaßen um. Nun sollte die Kongruenz von der Modalität des V_1 beeinflusst werden. Die Hypothese des Zählermodells ist also, dass Durchgänge mit dem visuellen Vergleichsintervall an erster Position V_1 schlechter diskriminiert werden. Damit sollten bei der Folge $V_1 - S_2$ visuell - auditive Durchgänge schlechter diskriminiert werden als auditiv - visuelle. Die Ergebnisse von Experiment 3 bestätigten diese Hypothese und weisen darauf hin, dass es offensichtlich weniger die Position der Modalität im Gesamtablauf, sondern die Position und die Modalität des variablen Vergleichsintervalls sind, die das Gesamtergebnis der Zeitwahrnehmung beeinflussen. Während das Zählermodell in der Lage war, den Umkehreffekt in der inkongruenten Bedingung bezüglich DL und CE vorherzusagen, berücksichtigte es zwei weitere Effekte nicht. Zum einen nahm die Ungenauigkeit der Diskriminationsleistung so erheblich zu, dass

sich die Werte tendenziell verdoppelten. Zum anderen trat bei diesem Experiment ein Kongruenzeffekt auf, indem kongruente Durchgänge erheblich genauer als inkongruente diskriminiert wurden. Da die qualitativen Aussagen des Zählermodells teilweise gut mit den Ergebnissen übereinstimmen, soll zunächst davon ausgegangen werden, dass sich an dieser Stelle mindestens zwei Effekte überlagern.

Ein Effekt, der an dieser Stelle die Befunde möglicherweise überlagert, lässt sich mit dem Entrainment Modell (Barnes & Jones, 2000; Large & Jones, 1999) beschreiben. Es beinhaltet, dass das Urteil einer Diskriminationsaufgabe durch die Rhythmik der gesamten Sequenz, die aus "Vorperiode – Intervall 1 – Interstimulusintervall ISI – Intervall 2" besteht, beeinflusst wird. Vereinfacht gesagt bedeutet das für die vorliegenden Experimente, dass ein Urteil umso genauer ausfällt, je rhythmischer oder einheitlicher die Zeitdauern präsentiert werden. Es impliziert, dass nicht nur zwei Intervalle miteinander verglichen werden, sondern die ganze Sequenz. Überlegungen, die in eine ähnliche Richtung gehen, finden sich auch in anderen Arbeiten (z. B. Fraise, 1984; Grondin & Rammsayer, 2003; Rammsayer, 1992). Da diese Effekte alle Zeitabschnitte mit einbeziehen, also auch die Vorperiode und das SOA oder Interstimulusintervall, sollten zur Überprüfung dieser Aussagen weitere Experimente durchgeführt werden, bei denen das SOA oder die Vorperiode in gleicher Weise variiert wie in Experiment 3 das Vergleichsintervall an erster Position V_1 . Mit anderen Worten, es sollte überprüft werden, inwieweit es für die Zeitwahrnehmung notwendig ist, dass eine feste Repräsentation aller Zeitabschnitte, einschließlich der Vorperiode und des Interstimulusintervalls, aufgebaut wird. Falls dem so ist, ginge eine mögliche Erweiterung des Zählermodells in die

Richtung, dass eine Größe, die die Variationen der vorangegangenen Intervalle berücksichtigt, mit eingeht. Darüber hinaus existieren weitere Untersuchungen, die berichten, dass die Information mehrerer vorangegangener Durchgänge zu einer Gesamtrepräsentation kombiniert wird. Ein Ansatz, der die Positionen zweier miteinander zu vergleichenden Intervalle in Abhängigkeit von den vorangegangenen zu beurteilenden Intervallen gewichtet, beschreiben Hellström und Rammsayer (2004). Dieser Effekt wurde bezüglich der visuellen Modalität in neueren Arbeiten öfter beschrieben (Morgan et al., 2000; Nachmias, 2006).

Getrennte Verarbeitung vs. multisensorische Integration. Neuerdings finden in der Literatur Wahrnehmungen, bei denen die Information bimodal präsentiert wird, große Beachtung. Im Wesentlichen geht es um die Frage, wie unser Wahrnehmungssystem den Informationsgehalt, bei dem eine Wahrnehmung, z. B. eine Bewegung im Raum oder eine Zeitdauer, über zwei verschiedene sensorische Systeme vermittelt wird, verarbeitet. In der Literatur werden im Wesentlichen zwei mögliche Verarbeitungsmechanismen diskutiert. Die Modality Appropriateness Hypothese nimmt an, dass die Modalität, die über die dominante sensorische Information für eine Wahrnehmung verfügt, die Urteile bestimmt. Bei der Zeitwahrnehmung wäre das die auditive Modalität (z. B. Walker & Scott, 1981; Welch et al., 1986). Damit würden die Versuchspersonen, falls es zu einem inneren Verarbeitungskonflikt der beiden Modalitäten kommt, die visuelle Information zugunsten der auditiven vernachlässigen. Im Gegensatz dazu steht die Optimal Integration Hypothese, der zufolge die verschiedenen Informationen aus den sensorischen Kanälen derart gewichtet werden, dass die Varianz minimiert wird. Damit sollte die bimodale Information genauer verarbeitet

werden als jede der beiden unimodalen (Ernst & Banks, 2002; Gepshtein et al., 2003; 2005). Dies konnten die Autoren für die Integration von visueller und haptischer Information experimentell bestätigen. Vergleichbare Befunde für die Zeitwahrnehmung sind jedoch noch recht uneinheitlich und selten (Grondin et al., 2005; Wada et al., 2003). Da in dieser Arbeit verschiedene bimodale Stimuli verwendet wurden, um das generalisierte Zählermodell zu überprüfen, sollte die Hypothese mit berücksichtigt werden. Möglicherweise lässt sich eine solche bimodale Integration auf den Bereich der Zeitwahrnehmung übertragen. In jedem Fall ist es interessant, welche Aussagen das Zählermodell dazu macht. Sollte jede Modalität über einen eigenen Zähler verarbeitet werden, so wäre es möglich, dass bei einer simultanen Darbietung von einem auditiven und einem gleichlangen visuellen Stimulus die jeweils akkumulierten Pulse zu einer modalitätenunspezifischen Größe gemittelt werden. Eine solche gemittelte Größe besitzt eine größere Reliabilität als jede einzelne modalitätsspezifische Größe. Aus diesem Grund sollte sich die zeitliche Diskriminationsfähigkeit verbessern, wenn ein Stimulus bi- anstatt unimodal dargeboten wird (Bresciani et al., 2006; Ernst & Banks, 2002; Gepshtein et al., 2003; 2005). Alternativ könnte sich auch gemäß der Modality Appropriateness Hypothese herausstellen, dass die Information des visuellen Stimulus zugunsten des auditiven vernachlässigt wird. Keine der beiden Hypothesen ließen sich eindeutig durch die Ergebnisse bestätigen. Stattdessen scheint ein flexibler Integrationseffekt aufzutreten. Wenn die auditive dominante Information in beiden Intervallen eines Durchgangs auftritt, scheint sie das Urteil maßgeblich zu bestimmen. Wenn die auditive Information nur in einem Intervall enthalten ist, treten Gewichtungsvorgänge auf. Sie werden besonders deutlich, wenn das Vergleichsintervall visuell

dargeboten wird, es wie die Experimente 4, 5 und 6 zeigen. Offensichtlich lassen sich Integrationsvorgänge bei der Zeitwahrnehmung nur dann nachweisen, wenn die Information verhältnismäßig unreliabel wird. Dies wurde in der Literatur auch gefunden und als flexible Gewichtung bei der bimodalen Integration (Heron et al., 2004; Van Beers et al., 2002; Wada et al., 2003) beschrieben. Für weitere Untersuchungen wäre es sicher interessant, bei Durchgängen mit bimodalen Intervallen gezielt die sensorische Information so zu ändern, dass sie unreliabel wird. In diesen Fällen sollten sich weitere Hinweise für die flexible Gewichtung ergeben.

Theoretisch bedeutsam ist dabei insbesondere, dass sich die Grundannahme des neuronalen Zählermodells zu bestätigen scheint, wonach sich die Repräsentationen der sensorischen Information von Zeitdauern für lange und kurze Intervalle gleichermaßen über Verteilungsfunktionen abbilden lässt. Insgesamt führt, wie es vorhergesagt wurde, die bimodale Darbietung nicht zu einer absoluten Verbesserung der Zeitwahrnehmung. Dafür ergaben sich Hinweise, dass die Information beider Intervalle in Abhängigkeit von der Reliabilität der sensorischen Information zu einem Gesamturteil integriert wird.

8.4 Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten und die Grenzen der aus dem neuronalen Zählermodell abgeleiteten Vorhersagen aufgezeigt. Obgleich sich nicht alle Vorhersagen bestätigen ließen, erwiesen sie sich doch als geeignet, brauchbare Arbeitshypothesen für die Zeitwahrnehmung zu liefern. Obgleich in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf die Diskriminations-

leistung gelegt wurde, wurden auch die Vorhersagen bezüglich der wahrgenommenen Länge miterfasst. Dass ein Modell geeignet ist, Vorhersagen bezüglich DL und CE zu machen, ist zumindest meinem Wissen nach einmalig. Da die Vorhersagen auch meist gut oder zumindest teilweise zutreffen, erscheint es auf jeden Fall lohnend, das neuronale Zählermodell für weitere Untersuchungen zu ergänzen.

In den vorliegenden Experimenten zeigten sich einige Grenzen des neuronalen Zählermodells. Zunächst existiert vorläufig noch keine genauere Parameterschätzung, die exakte Vorhersagen zulässt. Jedoch weisen einige Modifikationen der Parameter im Vorfeld darauf hin, dass sich die Muster nicht völlig ändern und sich diese Aufgabe lohnen würde.

Erstaunlich ist auch, dass insbesondere bei bimodalen Intervallen die Gewichtungsvorgänge bezüglich CE und DL unterschiedlich auszufallen scheinen. Während sich ein bimodales Standardintervall stabilisierend auf den CE auszuwirken scheint, verhält es sich bezüglich DL offensichtlich anders herum: Hier wirkte sich ein bimodales Vergleichsintervall stabilisierend, indem der Einfluss des unimodalen Standardintervalls nachließ. Eine genauere Untersuchung dieses Phänomens hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Da es sich bei CE und DL um unterschiedliche Maße für die Zeitwahrnehmung handelt, sollten in zukünftigen Untersuchungen die beiden Maße zugleich erhoben werden und überprüft werden, ob bezüglich DL und CE unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen eingesetzt werden.

Ein letzter Punkt, der hier angesprochen werden soll, besteht darin, dass die Reihenfolge von Standard- und Vergleichsintervall einen derart großen Einfluss insbesondere auf die Diskriminationsleistung ausübt. Dieser Effekt ließ sich mit den Vorhersagen in der vorliegenden Form nicht erklä-

ren. Es ist sicher interessant, in zukünftigen Untersuchungen zu überprüfen, ob dieses Phänomen auch bei einem bimodal dargebotenen V1 auftritt. Damit ließe sich sicher genauer darlegen, ob sich um einen stabilen Effekt handelt und ob er sich durch die Vorhersagen des Zählermodells erklären lässt.

Zusammenfassung

Die Zeitwahrnehmung wird von der Modalität der Intervalle beeinflusst. Die vorliegende Arbeit untersucht, ob sich aus Modellen zur Zeitwahrnehmung Hypothesen für den Fall ableiten lassen, dass bei einer Zeitdiskriminationsaufgabe zwei Modalitäten verwendet werden. In sechs Experimenten wurde überprüft, wie sich die Repräsentation der intermodalen Information für die Zeitverarbeitung abbilden lässt. In einem ersten Teil wurden intermodale Durchgänge verwendet, in denen alle möglichen Kombinationen der auditiven und der visuellen Modalität dargeboten wurden. Dazu wurden zwei Hypothesen aufgestellt. Die erste, die sensorisch - kognitive Kodierungshypothese, besagt, dass kurze Intervalle im Bereich von 100 ms über getrennte modalitätsspezifische Speicher in Zeiteinheiten kodiert werden (Cowan, 1997), lange im Bereich von 1000 ms jedoch amodal repräsentiert werden. Die zweite Hypothese leitet sich aus dem neuronalen Zählermodell (Creelman, 1962) ab, wonach lange und kurze Zeitdauern gleichartig verarbeitet werden. Die daraus generalisierte Form (Ulrich & Rammsayer, 2001; Ulrich et al., 2006a) leistet Vorhersagen, wonach die Zeitwahrnehmung von der Reihenfolge der dargebotenen Modalitäten und der Position des Standard- und Vergleichsintervalls abhängt. Die Vorhersagen des neuronalen Zählermodells ließen sich gut bestätigen. In einer zweiten Experimentalreihe wurden bimodale Intervalle verwendet. Wenn ein Intervall simultan auditiv und visuell dargeboten wird, liegt die zeitbezogene Information zweifach vor. In den Experimenten wurden das Standard-, das Vergleichsintervall oder beide Intervalle bimodal dargeboten. Wenn die kurzen Zeitdauern in nach Modalitäten getrennten Speichern verarbeitet werden, sollte laut der sensorisch - kognitiven Kodierungshypothese im

Konfliktfall eine Modalität bevorzugt verarbeitet werden (Welch et al., 1986). Die bevorzugte Verarbeitung der dominanten Modalität konnte nur teilweise bestätigt werden. Aus dem neuronalen Zählermodell ließen sich Vorhersagen ableiten, wonach die sensorische Information aus unterschiedlichen Sinnesmodalitäten zu einer Zeitrepräsentation integriert wird. Allerdings trat bei der bimodalen Darbietung keine Optimierung im Sinne einer Varianzreduzierung gegenüber der unimodalen Darbietung auf (Ernst & Banks, 2002; Gepshtein, 2005). Stattdessen zeigten sich asymmetrische Gewichtungsvorgänge, die bereits als flexible Gewichtungsvorgänge beschrieben wurden (Heron et al., 2004; Van Beers et al., 2002) und nur dann auftraten, wenn die Information der dominanten auditiven Modalität unreliabel wurde. Die Ergebnisse ergeben deutliche Hinweise dafür, dass sich das Prinzip der flexiblen bimodalen Gewichtung auch bei der Verarbeitung von zeitlicher Information nachweisen lässt.

Literaturverzeichnis

- Alais, D., & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current Biology*, *14*, 257-262.
- Allan, L.G. (1979). The perception of time. *Perception & Psychophysics*, *26* (5), 340-354.
- Allan, L.G., & Gibbon, J. (1994). A new temporal illusion or TOE once again? *Perception & Psychophysics*, *55* (2), 227-229.
- Barnes, R., & Jones, M.R. (2000). Expectancy, attention, and time. *Cognitive Psychology*, *41*, 254-311.
- Benedixen, A., Grimm, S., & Schröger, E. (2005). Human auditory event-related potentials predict duration judgments. *Neuroscience Letters*, *383*, 284-288.
- Bresciani, J.-P., Dammeier, F., & Ernst, M.O. (2006). Vision and touch are automatically integrated for the perception of sequences of events. *Journal of Vision*, *6*, 554-564.
- Brown, S.W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, *59*(7), 1118-1140.
- Brown, S.W., & Boltz, M.G. (2002). Attentional processes in time perception: Effects of mental workload and event structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28* (3), 600-615.
- Buhusi, C.V., & Meck, W.H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature*, *6*, 755-765.
- Carbotte, R.M., & Kristofferson, A.B. (1973). On energy-dependent cues in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, *14*(3), 501-505.
- Cowan, N. (1984). On short and long auditory stores. *Psychological Bulletin*, *96* (2), 341-370.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information - processing system. *Psychological Bulletin*, *104* (2), 163-191.
- Cowan, N. (1997). *Attention and memory. An integrated framework*. New York - Oxford: Oxford University Press - Clarendon Press.

- Creelman, C.D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 582-593.
- Dutke, S. (2005). Remembered duration: Working memory and the reproduction of intervals. *Perception & Psychophysics*, 67(8), 1404-1413.
- Ernst, M.O., & Banks, M.S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.
- Ernst, M.O., Banks, M.S., & Bühlhoff, H.H. (2000). Touch can change visual slant perception. *Nature Neuroscience*, 3(1), 69-73.
- Fendrich, R., & Corballis, P.M. (2001). The temporal cross-capture of audition and vision. *Perception & Psychophysics*, 63(4), 719-725.
- Fetterman, J.G., & Killeen, P.R. (1995). Categorical scaling of time: Implications for clock-counter models. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 21, 43-63.
- Fortin, C., & Breton, R. (1995). Temporal interval production and processing in working memory. *Perception & Psychophysics*, 57 (2), 203-215.
- Fortin, C., Rousseau, R., Bourque, P., & Kirouac, E. (1993). Time estimation and concurrent nontemporal processing: Specific interference from short - term - memory demands. *Perception & Psychophysics*, 53 (5), 536-548.
- Fraisse, P. (1984). Perception and estimation of time. *Annual Review*, 35, 1-36.
- Gepshtein, S., & Banks, M.S. (2003). Viewing geometry determines how vision and haptics combine in size perception. *Current Biology*, 13, 483-488.
- Gepshtein, S., Burge, J., Ernst, M.O., & Banks, M.S. (2005). The combination of vision and touch depends on spatial proximity. *Journal of Vision*, 5, 1013-1023.
- Getty, D.J. (1975). Discrimination of short temporal intervals: A comparison of two models. *Perception & Psychophysics*, 18 (1), 1-8.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- Goldstone, S., & Goldfarb, J.L. (1964). Auditory and visual time judgment. *Journal of General Psychology*, 70, 369-387.

- Goldstone, S., & Lhamon, W. T. (1974). Studies of auditory-visual differences in human time judgment: I. Sounds are judged longer than lights. *Perceptual & Motor Skills*, 39, 63-82.
- Goodfellow, L.D. (1934). An empirical comparison of audition, vision, and touch in the discrimination of short intervals of time. *American Journal of Psychology*, 46, 243-258.
- Grondin, S. (1993). Duration discrimination of empty and filled intervals marked by auditory and visual signals. *Perception & Psychophysics*, 54 (3), 383-394.
- Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127(1), 22-44.
- Grondin, S., Irvy, B.I., Franz, E., Perreault, L., & Metthé, L. (1996). Marker's influence on the duration discrimination of intermodal intervals. *Perception & Psychophysics*, 56(3), 424-433.
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G., & Lachance, R. (1999). When to start explicit counting in a time - intervals discrimination task: A critical point in the timing process of humans. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25 (4), 993-1004.
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G., & Ouellette, C. (1998). Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, 61 (4), 261-268.
- Grondin, S., & Rammsayer, T. (2003). Variable foreperiods and temporal discrimination. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A: Human Experimental Psychology*, 56A, 731-765.
- Grondin, S., & Rousseau, R. (1991). Judging the relative duration of multimodal short empty time intervals. *Perception & Psychophysics*, 49 (3), 245-256.
- Grondin, S., Roussel, E., Gamache, P., Roy, M., & Ouellet, B. (2005). The structure of sensory events and the accuracy of time judgments. *Perception*, 34, 45-58.
- Hellström, A. (2000). Sensation weighting in comparison and discrimination of heaviness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 6-17.
- Hellström, A. (2003). Comparison is not just subtraction: Effects of time- and space-order on subjective stimulus difference. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 1161-1177.

- Hellström, A., & Rammsayer, T. (2004). Effects of time-order, interstimulus interval, and feedback in duration discrimination of noise bursts in the 50- and 1000-ms ranges. *Acta Psychologica, 116*, 1-20.
- Heron, J., Whitaker, D., & McGraw, P.V. (2004). Sensory uncertainty governs the extent of audio-visual interaction. *Vision research, 44*, 2875-2884.
- Hillis, J.M., Ernst, M.O., Banks, M.S., & Landy, M.S. (2002). Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between, senses. *Science, 298*(5598), 1627-1630.
- James, W. (1890). The perception of time. In W. James (Ed.), *The principles of psychology* (1 ed., pp. 605-642). New York: Dover publications, Inc.
- Kaernbach, C. (1991). Simple adaptive testing with the weighted up - down method. *Perception & Psychophysics, 49* (3), 227-229.
- Killeen, P.R., & Fetterman, J.G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review, 95*, 274-295.
- Killeen, P.R., & Taylor, T.J. (2000). How the propagation of error through stochastic counters affects time discrimination and other psychophysical judgments. *Psychological Review, 107*, 430-459.
- Kristofferson, A. B. (1977). A real-time criterion theory of duration discrimination. *Perception & Psychophysics, 21*(2), 105-117.
- Large, E.W., & Jones, M.R. (1999). The dynamics of attending: How we track time varying events. *Psychological Review, 106*, 119-159.
- Lewis, P.A., & Miall, R.C. (2003). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology, 13*, 250-255.
- Mattes, S., & Ulrich, R. (1998). Directed attention prolongs the perceived duration of a brief stimulus. *Perception & Psychophysics, 60* (8), 1305-1317.
- Michels, W.C., & Helson, H. (1954). A quantitative theory of time-order effects. *American Journal of Psychology, 67*, 327-334.
- Michon, J.A. (1985). The compleat time experimenter. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 21-52). Berlin: Springer.
- Morein-Zamir, S., Soto-Faraco, S., & Kingstone, A. (2003). Auditory capture of vision: Examining temporal ventriloquism. *Cognitive Brain Research, 17*, 154-163.

- Morgan, M.J., Watamaniuk, S.N.J., & McKee, S.P. (2000). The use of an implicit standard for measuring discrimination thresholds. *Vision research*, *40*, 2341-2349.
- Münsterberg, H. (1889). *Beiträge zur experimentellen Psychologie: Heft 2*. Freiburg: Mohr.
- Nachmias, J. (2006). The role of virtual standards in visual discrimination. *Vision research*, *46*, 246-2464.
- Penner, M.J. (1976). The effect of marker variability on the discrimination of temporal intervals. *Perception & Psychophysics*, *19*, 466-469.
- Penney, T.B., Gibbon, J., & Meck, W.H. (2000). Differential effects of auditory and visual signals on clock speed and temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 1770-1787.
- Posner, M.I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rammsayer, T. (1992). *Die Wahrnehmung kurzer Zeitdauern: Allgemeinpsychologische und psychobiologische Ergebnisse zur Zeitdauerdiskrimination im Millisekundenbereich*. Münster; New York: Waxmann.
- Rammsayer, T. (1999). Neuropharmacological evidence for different timing mechanisms in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *52B/3*, 273-286.
- Rammsayer, T., & Brandler, S. (2004). Aspects of temporal information processing: A dimensional analysis. *Psychological Research*, *69*, 115-123.
- Rammsayer, T., & Grondin, S. (2003). Variable foreperiods and temporal discrimination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *56A(4)*, 731-765.
- Rammsayer, T., Henning, J., Haag, A., & Lange, N. (2001). Effects of noradrenergic activity on temporal information processing in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54B/3*, 247-258.
- Rammsayer, T., & Lima, S. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: Cognitive and perceptual factors. *Perception & Psychophysics*, *50*, 565-574.
- Rammsayer, T., & Ulrich, R. (2001). Counting models of temporal discrimination. *Psychological Bulletin & Review*, *8*, 270-277.
- Rammsayer, T., & Ulrich, R. (2005). No evidence for qualitative differences in the processing of short and long temporal intervals. *Acta Psychologica*, *120*, 141-171.

- Recanzone, G.H. (2003). Auditory influences in visual temporal rate perception. *Journal of Neurophysiology*, 89(2), 1078-1093.
- Ross, S.M. (1983). *Stochastic processes*. New York: Wiley.
- Rousseau, R., Poirier, J., & Lemyre, L. (1983). Duration discrimination of empty time intervals marked by intermodal pulses. *Perception & Psychophysics*, 34 (6), 541-548.
- Schröger, E., & Widmann, A. (1998). Speeded responses to audiovisual signal changes result from bimodal integration. *Psychophysiology*, 35, 755-759.
- Sternberg, S. (2001). Separate modifiability, mental modules, and the use of pure and composite measures to reveal them. *Acta Psychologica*, 106, 147-246.
- Thomas, E., & Cantor, N. (1978). *Interdependence between the processing of temporal and non-temporal information*. Hillsdale, NJ: Erlbaum: Requien, J.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs*, 77, 1-31.
- Ulrich, R., Nitschke, J., & Rammsayer, T. (2006a). Crossmodal temporal discrimination: Assessing the predictions of a general pacemaker-counter model. *Perception & Psychophysics*, 68(7), 1140-1152.
- Ulrich, R., Nitschke, J., & Rammsayer, T. (2006b). Perceived duration of expected and unexpected stimuli. *Psychological Research*, 70, 77-87.
- Van Beers, R.J., & Wolpert, D.M. (2002). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Current Biology*, 12, 834-837.
- Wada, Y., Kitagawa, N., & Noguchi, K. (2003). Audio-visual integration in temporal perception. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 117-124.
- Walker, J.T., & Scott, K.J. (1981). Auditory - visual conflicts in the perceived duration of lights, tones and gaps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7 (6), 1327-1339.
- Wearden, J., Edwards, H., Fakhri, M., & Percival, A. (1998). Why sounds are judged longer than lights: Application of a model of the internal clock in humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Comparative & Physiological Psychology*, 51B (2), 97-120.
- Welch, R.B., DuttonHurt, L.D., & Warren, D.H. (1986). Contributions of audition and vision to temporal rate perception. *Perception & Psychophysics*, 39(4), 294-300.

Welch, R.B., & Warren, D.H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, 88(3), 638-667.

Zakay, D., & Block, R.A. (1997). Temporal cognition. *Current Directions in Psychological Science*, 6(1), 12-16.