

**Die Manipulierbarkeit der mentalen Rotationsgeschwindigkeit  
als Hinweis auf eine analoge Informationsverarbeitung  
beim Menschen**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaft  
(Dr. rer. nat.)

dem Fachbereich Psychologie  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt

von

**Jasmin Bajric**

aus Kakanj / ehem. Jugoslawien

Marburg / Lahn 1999

Vom Fachbereich Psychologie  
der Philipps-Universität Marburg  
als Dissertation am 14. Januar 2000 angenommen.

Erstgutachter: Prof. Dr. Frank Rösler  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Harald Lachnit

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Januar 2000

## 1. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es einen empirisch brauchbaren Zugang zu Frage nach einer „analogen Informationsverarbeitung“ beim Menschen zu entwickeln. Dies geschah am Beispiel eines kognitiven Prozesses, dem zwar eine gewisse *kontinuierliche* Arbeitsweise oft unterstellt wurde, sie aber bislang noch nicht hinreichend überprüft wurde: die mentale Rotation.

In dem ersten Teil wird ein neues Paradigma entwickelt, mit welchem die mentale Rotationsgeschwindigkeit manipuliert werden kann. Beide dazu durchgeführten Untersuchungen (Experiment 1a und 1b) zeigen, dass die Kreisbewegung des Zielreizes, dessen Parität die Versuchspersonen beurteilen sollen, in der Lage ist, die Geschwindigkeit der mentalen Rotation zu beeinflussen. In dem Fall, dass die vom Zielreiz ausgeführte Bewegungsrichtung kongruent zu der mentalen Rotationsrichtung ist, zeigt sich eine Beschleunigung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit nimmt jedoch ab, wenn die beiden Bewegungsrichtungen inkongruent zueinander sind. Neben der erhöhten Praktikabilität dieses Paradigmas, scheint die Bewegungsrichtung des Zielreizes nicht zur einer symmetrischen Maximumverschiebung der Reaktionszeit über  $180^\circ$  zu führen, wie dies von bereits bekannten Paradigmen berichtet worden ist. Implizit spricht dies gegen die Annahme, dass die beobachtete Geschwindigkeitsdifferenz auf einen Strategiewechsel zurückzuführen ist.

Im zweiten Teil werden einige mögliche Randbedingungen für das Zustandekommen des oben beschriebenen Interferenzeffekts untersucht. Die Befunde aus Experiment 2a zeigen, dass eine Pendelbewegung des Zielreizes nicht in der Lage ist, eine Interferenz auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit auszuüben. Dies wird als Hinweis diskutiert, dass eine beliebige Bewegung des Zielreizes während der mentalen Rotation, nicht in der Lage ist, einen Einfluss auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit zu nehmen. Eine Kreisbewegung scheint dafür notwendig zu sein. Mit dem Experiment 2b wird die mögliche Hypothese geprüft, ob nicht die Wahrnehmung einer Kreisbewegung, die nicht eine Eigenschaft des Zielreizes ist, ein ähnliches Interferenzmuster auslösen kann. Die Be-

funde hier zeigen, dass die Rotation eines Punktes um den statischen Zielreiz hierfür nicht ausreichend ist.

Im dritten Teil wird mit Hilfe der additiven Faktoren Methode geprüft, auf welcher Verarbeitungsstufe innerhalb der mentalen Rotation die Kreisbewegung des Zielreizes wirksam ist. Hierbei zeigt sich, dass sich der Effekt der Bewegungsrichtung additiv zu einem Reizdiskriminationseffekt verhält, aber unteradditiv zu der Winkeldisparität des Zielreizes. Die Reizdiskrimination wiederum interagiert ebenfalls nicht mit der Winkeldisparität. Aus diesem Befundmuster wird gefolgert, dass die Kreisbewegung nicht auf einer früheren Verarbeitungsstufe als die mentale Rotation ansetzt. Der Effekt der Bewegungsrichtung scheint vielmehr auf der gleichen Verarbeitungsstufe wirksam zu sein, und dort genuin auf den mentalen Transformationsprozess einzuwirken.

Hauptgegenstand der Diskussion ist die von einigen Autoren vertretene *common-processes* Hypothese, die für die visuelle Wahrnehmung und visuelle Vorstellung, ein im wesentlichen identisches neuronales System annimmt. Demnach kommt der beschriebene Interferenzeffekt dadurch zustande, dass die mentale Rotation mit Hilfe eines Moduls verrichtet wird, welches gleichzeitig auch für die Wahrnehmung einer echten Rotationsbewegung eines Stimulus verantwortlich ist. Der Nachweis, dass die mentale Rotation einer realen *Bewegung* eines Körpers entspricht, wird als Hinweis für die Existenz eines *analogen* Informationsverarbeitungsprozesses beim Menschen diskutiert.

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Zusammenfassung .....	3
2. Einleitung.....	6
2.1 Mentale Rotation: Anatomie eines Paradigmas.....	11
2.1.1 Das Kriterium der positiven Steigung.....	17
2.1.2 Die Art und die Rolle von Distraktoren.....	18
2.1.3 Das Kriterium einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit.....	19
2.1.4 Das Kriterium der Paritätsentscheidung.....	24
2.2 Psychophysiologische Korrelate der mentalen Rotation.....	27
2.3 „Analoge Informationsverarbeitung“ - ein brauchbares Konzept? .....	40
2.3.1 Wie ist analoges Wissen repräsentiert?.....	40
2.3.2 Wie wird analoges Wissen verarbeitet?.....	47
2.4 Entwicklung einer Arbeitshypothese .....	59
2.4.1 Entwicklung eines neuen Paradigmas.....	61
3. Empirische Prüfung der Fragestellung.....	68
3.1 Erster Teil: Untersuchungen mit dem neuen Interferenzparadigma.....	72
3.1.1 Experiment 1a: Die Interferenz von physikalischer und mentaler Rotation als Indikator für den Bewegungscharakter eines Prozesses .....	72
3.2 Zweiter Teil: Untersuchung der Randbedingungen für den Interferenzeffekt .....	97
3.2.1 Experiment 2a: Die Bedeutung der Initialrichtung .....	98
3.2.2 Experiment 2b: Die Bedeutung einer peripheren Bewegung.....	109
3.3 Dritter Teil: Untersuchung des Interferenzparadigmas mit Hilfe der AFM.....	119
3.3.1 Experiment 3: Analyse der Verarbeitungsstufen .....	120
4. Diskussion.....	134
4.1 Teil 1: Entwicklung eines neuen Paradigmas.....	136
4.1.1 Experiment 1a .....	138
4.1.2 Experiment 1b.....	142
4.2 Teil 2: Randbedingungen für den Interferenzeffekt.....	154
4.2.1 Experiment 2a.....	155
4.2.2 Experiment 2b.....	158
4.3 Teil 3: Lokalisation der Verarbeitungsstufe.....	161
4.4 Über die neuronale Implementierung des Interferenzeffekts .....	169
5. Literaturverzeichnis .....	175
6. Danksagung .....	181

## 2. Einleitung

*Im folgendem möchte ich Gründe dafür nennen warum die sog. 'mentale Rotation' innerhalb der psychologischen Kognitionswissenschaft zu einem Paradigmenwechsel geführt hat. Sie stieß die Diskussion um eine andere - neben der propositionalen - Art der Verarbeitung von Wissen an: die **analoge Informationsverarbeitung**. Hierbei lassen sich zwei Teilaspekte unterscheiden: analoge Repräsentationen, und analoge Prozesse, die auf diesen Repräsentationen operieren. Ziel ist es, die mentale Rotation als einen **analogen Prozeß** zu identifizieren. Hierbei fällt der Rotationsgeschwindigkeit die entscheidende Rolle zu: Als Maß für die Verarbeitungsgeschwindigkeit eignet sie sich für eine experimentelle Manipulation, mit dem Ziel den **kontinuierlichen Bewegungscharakter** der mentalen Rotation zu belegen. Der Nachweis dieses Wirkprinzips, der der mentalen Rotation zwar oft implizit unterstellt wurde, dessen Nachweis aber bisher eher indirekt geschah, würde einen starken Beleg für die von Kosslyn und anderen Autoren vertretene Ansicht abgeben, daß die visuelle Wahrnehmung und bildhafte Vorstellung, zumindest temporär die selben Verarbeitungsmodule nutzen. Zum Schluß dieses einführenden Teils wird die **Arbeitshypothese** entwickelt werden, daß die Existenz eines analogen Prozesses dann angenommen werden kann, wenn sich seine Verarbeitungsgeschwindigkeit als selektiv beeinflussbar zeigt, unter der Bedingung, daß ein zweiter, analoger Prozeß aktiv ist. Der empirische Zugang zu dieser Fragestellung wird durch ein Interferenzparadigma entwickelt werden, welches die Untersuchung der Rotationsgeschwindigkeit unter dem Einfluß der Wahrnehmung einer Kreisbewegung erlaubt.*

Das charakteristische Merkmal *wissenschaftlicher Revolutionen* ist ihr hartnäckiger Widerstand gegen jede Einordnung in die vorhandenen Paradigmata (Kuhn, 1996). Sie lassen sich nicht in den kontinuierlichen und kumulativen Prozeß des Wissenszuwachses einordnen, wie es für die übrigen Phänomene gilt, die innerhalb der normalen Wissenschaft beobachtet werden. Wissenschaftliche Revolutionen zwingen zu einem *Paradigmenwechsel*, da sie Anomalien darstellen, die bisher außerhalb des Gesichtsfeldes der Wissenschaftler lagen und mit Hilfe von bereits bestehenden Theorien nicht erklärt werden können - jedenfalls nicht ohne die Zahl der *ad hoc*-Modifizierungen und Ausweitungen bestehender Theorien zu infaltionieren. Der Fortschritt in den Wissenschaften ist auf solche Ereignisse angewiesen, da sich erfolgreiche Wissenschaften eben nicht kumulativ entwickeln, sondern in Phasen, die durch Krisen hervorgerufen werden (Kuhn, 1996). Nur diese Krisen oder wissenschaftliche Revolutionen lassen, falls sie zu anerkannten Anomalien werden, neue Theorien entstehen. Im folgendem möchte

ich Argumente dafür nennen, warum es sich bei der sog. „*mentalen Rotation*“ um eine wissenschaftliche Revolution einerseits gehandelt hat, andererseits aber die Interpretation dieses Phänomens noch nicht den Status einer bestätigten Theorie erreicht hat, da wesentliche Bestimmungsstücke der Theorie noch unspezifiziert geblieben sind.

Die mentale Rotation wird in der Literatur oft als Beispiel für einen Verarbeitungsmodus des Gehirns genommen, bei dem bildhafte Vorstellungen entstehen (Kosslyn & Pomerantz, 1990). Bevor jedoch das Paradigma im Einzelnen besprochen wird, und die Befundlage hinsichtlich dieser Behauptung geprüft wird, möchte ich einen kurzen historischen Abriss über die wissenschaftliche Beschäftigung mit bildhaften Vorstellungen geben, der die lange Genese hin zu einem empirisch brauchbaren Paradigma deutlich macht.

Die Geschichte zeigt eine rege Auseinandersetzung mit dem Phänomen bildhafter Vorstellungen bereits in der Antike. Aristoteles hatte bereits eine konkrete Vorstellung darüber, was unter bildhaften Vorstellungen zu verstehen sei. Bildhafte Vorstellungen müßten Kopien von dem sein, was sie repräsentieren - also innere Bilder von der äußeren Welt (Tye, 1991). Er zieht damit deutliche Parallelen zwischen bildhafter Vorstellung und der Betrachtung eines realen Bildes. Eine ganz ähnliche Ansicht vertrat Platon und schuf durch das Höhlengleichnis wohl die berühmteste bildhafte Vorstellung, indem er den Leser dazu auffordert ein komplexes inneres Bild dieses Gleichnisses aufzubauen. Sowohl für Aristoteles als auch für Platon waren innere Bilder Werkzeuge des Geistes, deren Existenz sie ebenso wenig bestritten wie z.B. die Sprache oder die Logik. Descartes hingegen vertrat eine differenziertere Sichtweise. Er vertrat die Ansicht, daß wir uns mühelos ein Pentagon in der Weise vorstellen können, daß wir es von einem Hexagon unterscheiden können. Hingegen können wir uns in der selben Weise kein 1000-seitige Figur vorstellen und sie von einer 999-seitigen Figur in der Vorstellung unterscheiden. Hieraus folgt Descartes' Überlegung, daß bildhafte Vorstellungen nicht dasselbe wie das Denken seien (Tye, 1991). Bildhafte Vorstellungen haben eher einen flüchtigen Charakter da sie sich sehr

schnell Auflösen und sie beinhalten wenig Details<sup>1</sup>. Ich werde später deutliche Parallelen zwischen Descartes' Ansichten, insbesondere was das relativ schnelle „Ausbleichen“ einer visuellen Vorstellung betrifft und einem der prominentesten Theoretiker heutiger Zeit *Stephen Kosslyn* aufzuzeigen versuchen. Die Reihe der Philosophen, die sich mit bildhaften Vorstellungen und deren Natur beschäftigten ist ungleich länger als die hier aufgezeigte - insbesondere seien hier Hobbes, Locke, Berkeley, und Hume genannt - deren Einfluß jedoch in dem Maße zu schwinden begann, wie sich Leibniz' Einfluß durchzusetzen begann, kognitive Prozesse zu formalisieren (eine zusammenfassenden Rückblick gibt Tye, 1991). Bildhafte Vorstellungen eignen sich nur unzureichend für die Ausarbeitung logischer Kalküle - auch wenn deren Existenz nicht wirklich bestritten wurde, klammerte man sie doch aus der Betrachtung aus. Bildhafte Vorstellungen gerieten damit insbesondere im Laufe des 19. Jahrhunderts, zunehmend in den Verdacht einer nur privaten Wirklichkeitsauffassung (Sachs-Hombach, 1995). In ähnlicher Weise, wie sich die Philosophie von diesem Thema distanzierte, nahm sich eine andere, ganz junge Wissenschaft des Themas bildhafter Vorstellungen an: die Psychologie.

Wenn man die Gründung der (deutschen) Psychologie als Wissenschaft mit dem Datum der Gründung des Leipziger Labors von Wilhelm Wundt 1879 belegt<sup>2</sup>, dann fällt zunächst auf, daß die Psychologie, in ihrem Bemühen sich von der Philosophie zu trennen doch noch immer stark von ihr beeinflusst zeigt. Die Untersuchung des Phänomens bildhafter Vorstellungen stößt auch hier zunächst im Rahmen der Introspektion auf große Ablehnung und später dann im Rahmen experimenteller Untersuchungen der Würzburger Schule. Bildhafte Vorstellungen treten nicht notwendig im Denkprozeß auf und gehören somit nicht in das Blickfeld der Psychologie, war die gängige Lehrmeinung (Sachs-Hombach, 1995). Diese Ansicht gipfelt dann in der Arbeit J.B. Watsons (1913) worin programmatisch die methodischen Prinzipien des Behaviorismus entwickelt werden, der be-

---

<sup>1</sup> Descartes' Argument für die geringe Auflösung des geistigen Vorstellungsbildes greift aber insofern zu kurz, als uns die visuelle Wahrnehmung vermutlich auch keine Unterscheidungshilfe zwischen diesen beiden Polygonen bietet.

<sup>2</sup> Die Nennung eines bestimmten Datums als Anfang einer gesamten Wissenschaft hat nur praktische Gründe und keine kausalen, da vereinzelt bereits Jahrzehnte vorher wissenschaftliche Psychologie betrieben wurde (siehe z.B. Legewie & Wolfram, 1992).



kanntermaßen die Betrachtung alles „mentalen“ ablehnt. Bis in die '60er Jahre dieses Jahrhunderts finden wir außerhalb Deutschlands keine breite Beschäftigung innerhalb der Psychologie mit diesem Thema. Innerhalb Deutschlands jedoch, etabliert sich um 1927 in Marburg eine Forschungsrichtung zum Thema "eidetische Anschauungsbilder" unter Federführung von Emil Jaensch und Oswald Kroh (Jaensch, 1927). Sie verstehen unter bildhafter Vorstellung "die Fähigkeit, einen Sinneseindruck nach kürzerer oder längerer Zwischenzeit mit sinnlicher Deutlichkeit zu reproduzieren, z.B. eine optische Vorlage im ganz eigentlichen und wörtlichen Sinne wieder zu 'sehen' " (Schumann-Hengsteler, 1995). Jaensch weist den Anschauungsbildern damit eine eigene Stellung zwischen Wahrnehmung und Vorstellung zu. Diese Ansicht wird später von Düker (Düker, 1965) zurückgewiesen. Düker (1965) kritisierte insbesondere die Ansicht Anschauungsbilder weder als Wahrnehmung noch als Vorstellung aufzufassen, sowie deren problematische Operationalisierung, was später auch zur Aufgabe des Eidetik-Konzepts führte (Schumann-Hengsteler, 1995).

Das Ende der 60er Jahre entwickelte und 1971 von Shepard und Metzler publizierte Paradigma unterschied sich nun aber grundlegend von den berichteten Ansätzen zur Erforschung visueller Vorstellungen. Das Paradigma erfüllte eine zentrale Forderung, die Watson (1913) an jegliche wissenschaftliche Beschäftigung des menschlichen Verhaltens stellte. So sollte sie sich auf objektive Forschungsmethoden beschränken, die von der Forschergemeinschaft akzeptiert und von allen anwendbar und quantifizierbar sind. Die Verwendung von Reaktionszeiten als abhängige Variable erfüllte diese Forderung. Gleichwohl mißachtete das Shepard und Metzler Paradigma eine ebenso wichtige Forderung: Die ausschließliche Beschäftigung mit "*beobachtbarem Verhalten*" - Themen wie Geist, Denken, Vorstellung etc. sollten strikt gemieden werden. Gerade aber die Interpretation des Phänomens mentale Rotation, war es, die diesen Untersuchungsansatz so erfolgreich machte. Die Mißachtung der zweiten Forderung Watsons (Watson, 1913) verliert jedoch an Schwere, wenn man bedenkt, daß Watsons Einfluß in den 60er Jahren doch schon sehr gering war und vielmehr ein ganz anderes Denken, das wissenschaftliche Tun der Forscher beherrschte: das Computermodell des Denkens. Die Arbeitsweise eines Computers wurde als Metapher für die Arbeitsweise des Gehirns angesehen. Grundlegende

für die Arbeitsweise des Gehirns angesehen. Grundlegende Denkopoperationen lassen sich demnach mit Hilfe der Informationstheorie erklären. Hier wird die These vertreten, daß die menschliche Informationsverarbeitung *symbolisch* ist (siehe dazu Heil, 1994). D.h. Informationsverarbeitung wird als Manipulation von Symbolen nach formalen Regeln aufgefaßt. Zu einer Zeit also, in der sich die im Aufstreben befindende Kognitionswissenschaft an der Arbeitsweise des Computers orientierte, und die Beschäftigung mit universellen Automaten als erfolgversprechend galt, wurde von Shepard und Metzler ein Phänomen berichtet, welches dem Computermodell des Denkens eklatant zu widersprechen schien. Dieses Phänomen soll im folgendem zunächst beschrieben werden, und hiernach der Widerspruch zu dem gängigen Vorstellungen über die Arbeitsweise des Gehirns dargelegt werden.

## 2.1 Mentale Rotation: Anatomie eines Paradigmas

*Bevor in den nächsten Kapiteln sowohl erkenntnistheoretische als auch empirische Befunde, die aus den Ergebnissen der sog. Imagery Forschung stammen, berichtet werden, wird zunächst dargestellt werden, unter welchen Bedingungen eine mentale Rotation ausgelöst werden kann. D.h. es werden die wesentlichen Parameter und ihre Wirkung in einer geeigneten Versuchsanordnung berichtet.*

Der Begriff „mentale Rotation“ wird in der Literatur zum einen für das Paradigma (Versuchsanordnung) verwendet, zum anderen aber auch als Beschreibung des kognitiven Prozesses gebraucht, der nötig ist, um Aufgaben, wie sie im Rahmen des Paradigmas vorgelegt werden, zu bearbeiten; nämlich das gedankliche Drehen eines Objekts zu einer finalen räumlichen Ausrichtung (*mentales rotieren*). Die Verwendung des selben Namens sowohl für die Meßappartur, wie für die zu erfassenden Meßgröße soll im folgenden vermieden werden. Ist der kognitive Prozeß gemeint, wird von dem „mentalen Rotations Prozeß“ gesprochen werden - ist hingegen der experimentelle Aufbau oder die zeitliche Abfolge der Ereignisse innerhalb eines Experiments gemeint, wird vom „mentalen Rotations Paradigma<sup>3</sup>“ die Rede sein.

Innerhalb der Psychologie war das Phänomen der geistigen Transformation der räumlichen Ausrichtung eines vorgestellten Objekts bereits vor 1971 ein Beschäftigungsfeld. Es wurde im Kontext der Psychometrie und der kognitiven Entwicklungspsychologie studiert. Mentale Rotation war die Basis des „Space Tests“ in Thurstone's (Thurstone, 1938) Primary Mental Ability Test und war die Grundlage für die Entwicklung des Intelligenz-Struktur Modells von Guilford und Hoepfner (Guilford & Hoepfner, 1971). Piaget und Inhelder (Piaget & Inhelder, 1975) benutzte Aufgaben, die mit Hilfe des mentale Rotations Prozesses zu lösen waren: z.B. die Beschreibung von Szenen aus verschiedenen Perspektiven. Piaget und Inhelder (Piaget & Inhelder, 1975) vermuteten, daß Kinder unter 8 Jahren diese Aufgabe nicht lösen können. Erst mit dem Erreichen der „konkret operationalen Phase“ können sie solche Art von Aufgaben richtig lösen.

Der Kernpunkt des von Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1971) verwendeten Versuchsanordnung war die Präsentation von zwei Objekten, von denen eines der Objekte in seiner räumlichen Ausrichtung von dem Vergleichsobjekt abweichen konnte. Die Probanden sollten beurteilen, ob das gedrehte Objekt *nur* in seiner Ausrichtung vom Vergleichsobjekt abwich, oder ob es sich um ein Objekt handelte, welches neben der unterschiedlichen Orientierung noch zusätzlich an der Vertikalen *gespiegelt* worden war. Die Zeit, die zwischen der Präsentation der beiden Objekte und der korrekten Antwort des Probanden verstrich, nahmen sie als Maß für den Verarbeitungsaufwand. Die wichtigste experimentelle Variation war die Differenz der Abweichung der beiden Objekte. Wesentliche Einzelheiten des Paradigmas sind im Exkurs 1 dargestellt.

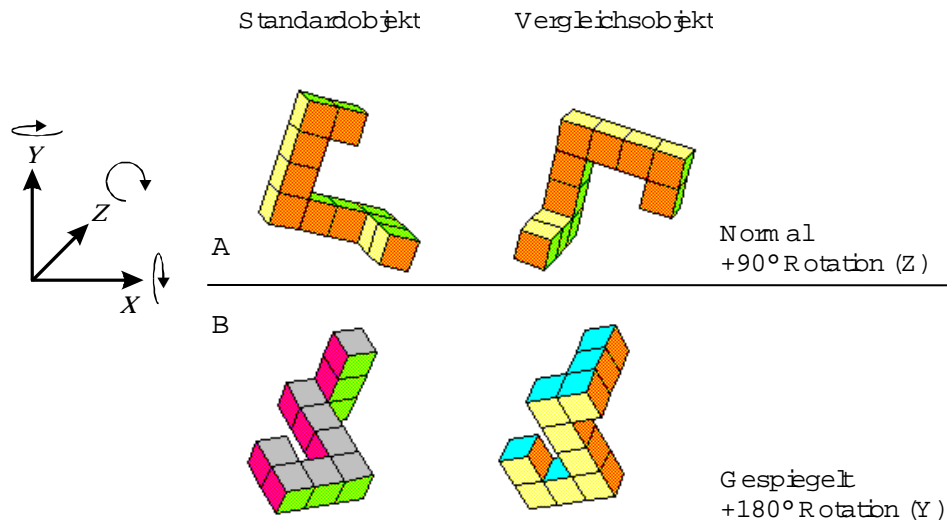
---

<sup>3</sup> Der von Kuhn (1996) eingeführte Begriff **Paradigma** bezeichnet die von einer Forschergemeinschaft akzeptierte Menge an interessanten Problemstellungen und mögliche Wege zu deren Lösungen und was als **beispielhafte Fälle** solcher Problemlösungen anerkannt ist.

## Exkurs 1

### Mentale Rotation von dreidimensionalen Objekten: Shepard & Metzler (1971)

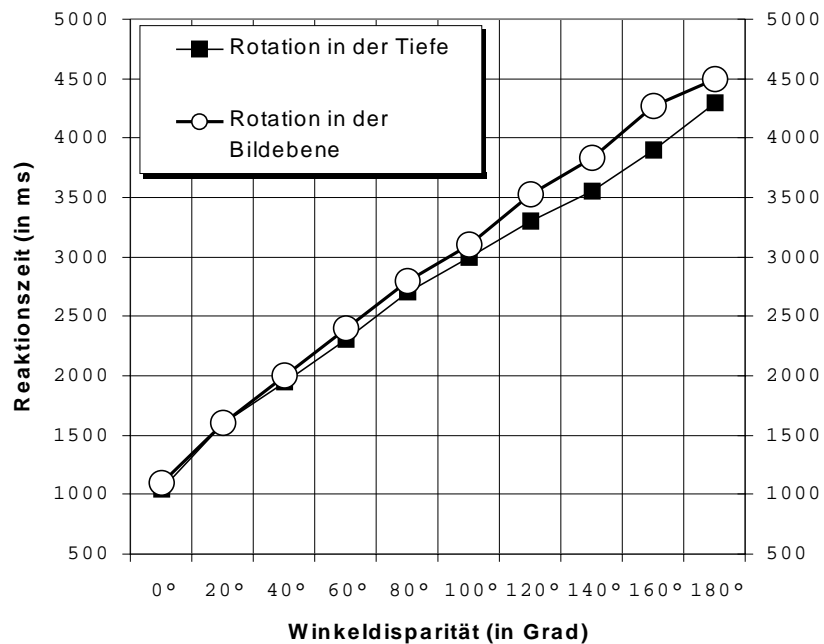
Shepard und Metzler boten ihren Versuchspersonen Paare perspektivisch gezeichneter dreidimensionaler Würfelobjekte dar (Standard- und Vergleichsobjekt). Die Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob es sich um identische oder spiegelverkehrte Objekte handelte. Eines der Objekte konnte neben der Spiegelung zusätzlich um einen bestimmten Betrag an einer der drei Raumachsen rotiert sein. Zwei mögliche Experimentalsituationen (A und B) zeigt die folgende Illustration:



Die Sehachse des Betrachters verläuft parallel zur Z-Achse des 3D-Koordinatensystems, die X-Achse kennzeichnet die Horizontale, die Y-Achse die Vertikale. Der Schwerpunkt eines Objekts bildet den Ursprung des Koordinatensystems. Um eine gespiegelte Version eines Objektes zu erhalten, spiegelte man es in seiner Standardausrichtung (0°) an der Y-Achse und rotierte erst dann.

Den Vpn wurden drei Blöcke mit jeweils 400 bzw. 800 Einzelaufgaben (trials) präsentiert. Der erste Block ("depth-condition") enthielt 400 trials mit Bildpaaren, die stets um die Y-Achse rotiert sein konnten. Im nächsten Block ("picture-plane-condition") wurden ebenfalls 400 Bildpaare gezeigt, die in der Bildebene rotiert sein konnten, und schließlich wurden im dritten Block 800 Bildpaare präsentiert, die um eine der beiden Achsen (Z oder Y-Achse) rotiert sein konnten. In diesem Block war die Achse um die rotiert wurde den Vpn nicht bekannt - eine kombinierte Rotation um Z und Y wurde niemals präsentiert.

Die Vpn waren instruiert so schnell wie möglich zu antworten, jedoch die Zahl der Fehlentscheidungen so gering wie möglich zu halten. Die Reaktionszeit wurde vom Beginn der Darbietung der beiden Zeichnungen (Stimulus-onset) bis zur Reaktionsabgabe gemessen. Der typische Verlauf der Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldifferenz der beiden Objekte ist schematisch in der nächsten Abbildung gezeigt (Daten entnommen aus (Shepard & Metzler, 1971)):



Der monotone Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Winkeldisparität des Standard- und Vergleichsobjektes wurde von Shepard & Metzler (1971) als Beleg gewertet, daß die Vpn das Vergleichsobjekt mental rotierten: Das Vergleichsobjekt wird in der Vorstellung in eine ähnliche räumliche Ausrichtung gedreht wie das Standardobjekt. Jetzt erst kann der Vergleich gespiegelt / normal getroffen werden. Der Begriff "Rotation" wurde bewußt in Analogie zu einer realen physikalischen Drehung eines Objekts gewählt. Es erfolgt keine Kippung des Objekts, bei der verschiedene Winkellagen des Objekts übersprungen werden, vielmehr handelt es sich um eine gleichmäßige Drehung, die alle Winkellagen bis zur Zielausrichtung durchläuft. Mathematisch läßt sich der Verlauf der Reaktionszeiten durch eine Gerade beschreiben:

$$RT = a + bW$$

wonach sich die Reaktionszeit (engl. *reaction time*, RT) aus der Konstanten *a* (Dauer der Prozesse, die *winkelunabhängig* sind; also gleichbedeutend mit der 0°-Bedingung [=Y-Achsenabschnitt]) und dem Produkt aus der Rotationsgeschwindigkeit (*b*) und dem Betrag der Winkeldisparität (*W*) ergibt. An geeigneterer Stelle wird über die Steigung (*b*) der Kurve und deren inhaltliche Bedeutung ausführlicher die Rede sein - im vorliegenden Fall betrug sie 17,5 ms / Grad, bzw. 55° / s - unabhängig davon ob eine Rotation in der Bildebene oder in der Tiefe gefordert war.

Die vorliegende Arbeit wird sich ausschließlich mit der *zweidimensionalen* Rotation beschäftigen. Die Darstellung der ersten Arbeit von Shepard und Metzler zur mentalen Rotation macht es erforderlich, den Unterschied zwischen zwei- und dreidimensionaler Rotation darzustellen - der wesentliche Befund aber bleibt der nahezu lineare Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Winkeldisparität.

Die auf den ersten Blick simpel erscheinende Aufgabe zu entscheiden ob zwei gleiche Objekte, die gegeneinander verdreht sein können, gespiegelt sind oder nicht, erlaubte Fragestellungen über die Arbeitsweise des Gehirns, die im krassen Gegensatz zur Einfachheit der Aufgabe standen. Der zeitfordernde Charakter des so provozierten Antwortprozesses wurde durch die Manipulation der Winkeldifferenz der beiden Objekte beobachtbar: Die zunehmende Abweichung der räumlichen Ausrichtung beider Objekte, drückte sich direkt in der zunehmenden Reaktionszeit aus. Der maximale Zeitverbrauch war bei der größtmöglichen Abweichung bei 180° erreicht. Eine *posthoc* Erklärung für diese Zeitcharakteristik der Reaktionszeiten fand sich in den introspektiv gewonnenen Daten der Teilnehmer an diesem Experiment. Die Versuchspersonen berichteten, sie stellten sich das Vergleichsobjekt in einem betrachterzentrierten dreidimensionalen Raum vor, und konnten dann dieses Objekt um jede beliebige Achse drehen, indem sie die Objekte in ihrer Vorstellung in Bewegung versetzten und sie solange rotierten, bis sie deckungsgleich waren - innere Bilder entstanden also als Konsequenz der aktiven geistigen Tätigkeit. Shepard & Metzler (1971) legten aufgrund dieser Ergebnisse die Vermutung nahe, die Versuchspersonen simulierten quasi ein physikalische Rotation eines Körpers indem sie ihn in *Bewegung* versetzten. Diese Bewegung schien ähnlichen Gesetzen zu unterliegen scheint, wie es die reale physikalische Bewegung eines Körpers tut: Ein Körper kann nicht um einen bestimmten Winkelbetrag gedreht werden ohne diejenigen Winkel zu durchlaufen, die zwischen der Ausgangsposition und der Zielposition liegen. Neben der bemerkenswerten Hypothese, daß unsere Vorstellungswelt teilweise verinnerlichten Naturgesetzen zu unterliegen scheint, wurde mit dieser Untersuchung eine weitere hypothetische Annahme über die Arbeitsweise des Gehirns geäußert, die zwar nicht neu war, nun aber erstmals empirische Unterstützung erhielt: Die Lösung der gestellten Aufgabe wird mit Hilfe von **bildhaften Vorstellungen** (engl. *imagery*) gelöst, die geeignet sind, Konsequenzen von Handlungen (hier: das Drehen eines der Objekte) abzuschätzen. Das folgende Zitat eines der Autoren des nunmehr klassischen Paradigmas, gewährt nicht nur einen Einblick in die Gedankenwelt eines Forschers zu einem der vielleicht spannendsten Augenblicke in seiner Arbeit, sondern auch gleichzeitig wie bildhafte Vorstel-

lungen zur Konstruktion des Paradigmas mit denen sie selbst untersucht werden sollten, beigetragen haben:

*In any case, the very line of chronometric studies of the transformations of mental images assembled in this volume had its origin in a state of hypnopompic suspension between sleep and wakening, in the early morning of November 16, 1968. Just before 6:00 A.M. on that morning and in the absence of any noticed precursors, one of us experienced a spontaneous kinetic image of three-dimensional structures majestically turning in space. Within moments and before full emergence from sleep, the basic design of the first of the chronometric experiments on 'mental rotation of three dimensional objects' as it later appeared in the journal Science (Shepard & Metzler, 1971) took essentially complete - although as yet completely un verbalized - shape (see Shepard, 1978b, p.183).*

*Shepard & Cooper (1982)*

Die mittlere Rotationsgeschwindigkeit in der von Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1971) berichteten Studie betrug ca. 60°/s (für dreidimensionale Reize). Daß es sich bei diesem Wert nicht um ein oberes Limit der Rotationsgeschwindigkeit handelt, zeigt eine Studie, die von Cooper & Shepard (Shepard & Cooper, 1982) berichtet wird. Wesentlicher Unterschied zu Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1971) war, daß den Versuchspersonen hier, alphanumerische Zeichen zur Paritätsprüfung vorgelegt wurden. In dieser Studie (Cooper, 1975) berichten die Autoren, beträgt die mentale Reaktionsgeschwindigkeit die aus der Steigung der Reaktionszeitkurve direkt abgeleitet wird, ca. 400°/s. Das ist ungefähr das 6fache der Geschwindigkeit, die in der vorangegangenen Studie (Shepard & Metzler, 1971) berichtet wurde.

Obwohl die Reaktionszeiten in beiden Untersuchungen einen ähnlichen Verlauf hatten, erscheint doch der Unterschied in den Rotationsgeschwindigkeiten enorm - auch wenn in Rechnung gestellt wird, dass es sich einmal um zwei- und das andere mal um dreidimensionale Reize handelte. Bei einer so hohen Varianz der Geschwindigkeiten ist die Frage, ob die beiden Paradigmen überhaupt den gleichen kognitiven Prozeß auslösen berechtigt. Anders formuliert: Welche Parameter des Reaktionszeitverlaufs lassen auf mentale Rotation schließen? Co-



hen und Kubovy (Cohen & Kubovy, 1993) definieren hierfür zwei Kriterien, die erfüllt sein müssen, damit man von mentaler Rotation sprechen kann:

- [1.] *Das Kriterium der positiven Steigung*

Der Antwortprozeß dauert um so länger, je größer die Winkeldisparität der beiden zu vergleichenden Objekte ist. D.h. die Reaktionszeit ist eine monoton steigende Funktion der Winkeldisparität  $\alpha$ .

- [2.] *Das Kriterium einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit*

Eine maximale Rotationsgeschwindigkeit kann nicht überschritten werden. Sollte sie überschritten werden, so Shepard & Cooper (Shepard & Cooper, 1982) könne nicht von einer mentalen Rotation gesprochen werden. „*The subject ... can perform this analog process at no faster than some limiting rate*“ (Shepard & Cooper, 1982, p. 43).

Ein weiteres Kriterium wurde bereits von Cooper (Cooper, 1975) eingeführt, welches vielleicht den Kernpunkt der mentalen Rotation am besten trifft:

- [3.] *Das Kriterium der Paritätsentscheidung*

Die Vpn müssen die Aufgabe haben eine Händigkeit- oder Paritätsentscheidung zu treffen. Ein mentaler Rotationsprozeß tritt nur dann auf, wenn (a) eine Winkeldisparität der beiden zu vergleichenden Objekte verschieden von Null ist, und (b) die Versuchspersonen die Aufgabe haben zu entscheiden, ob eines der beiden Objekte gespiegelt ist oder nicht.

### **2.1.1 Das Kriterium der positiven Steigung**

Die bereits berichtete Studie von Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) konnte einen deutlichen Zuwachs der Reaktionszeit mit zunehmender Winkeldisparität zeigen. Daß jedoch gerade bei kleineren Winkeldisparitäten nicht von einer monotonen Steigung gesprochen werden kann, zeigen Studien, die die verschiedenen Winkellage in kleinen Schritten (von z.B. 10° oder weniger) realisiert hatten (siehe hierzu die Schwellenwert Hypothese in [3.a]). Hier ist vielmehr bis zu einer bestimmten Winkeldisparität eine Steigung zu beobachten,

die nahezu gleich Null ist. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Null-Steigung eine Folge der hoch-überlernten Reize ist: Bei der Verwendung alphanumerischer Reize lässt sich davon ausgehen, dass sie in der Umwelt auch nicht immer in ihrer aufrechten Orientierung ( $0^\circ$ ) zu sehen sind, und wir somit auch die leicht abweichenden Orientierungen z.B. eines Buchstabens lernen. Daraus ergibt sich eine im gewissen Maße „orientierungsfreie“ Repräsentation des Buchstabens.

### **2.1.2 Die Art und die Rolle von Distraktoren**

An dieser Stelle möchte ich auch auf die Art und die Funktion von Distraktoren innerhalb des mentalen Rotations Paradigmas eingehen, für die das Kriterium der positiven Steigung ebenfalls gilt, sie aber häufig nicht gesondert ausgewertet werden. Typischerweise werden als Distraktoren gespiegelte Objekte verwendet. Dabei handelt es sich um die gleichen Figuren wie sie als Standardobjekte Verwendung finden, die jedoch *vor* der Rotation an der Vertikalen gespiegelt werden. Somit besteht ein kompletter Satz von Objekten zur Hälfte aus Standardreizen (in der Standardausrichtung und in der rotierten Ausrichtung) und zur anderen Hälfte aus den gespiegelten Distraktoren. Die Begründung für gespiegelte Distraktoren findet sich bei Shepard & Cooper (Shepard & Cooper, 1982, p. 26): *„The choice of objects that are mirror-images of each other for the ‚different‘ pairs was intended to ensure that the decision as to whether two objects were the same or different was made only on the basis of global shape and not on the basis of any local features“*. D.h. durch die Spiegelung wird erwartet, daß die Versuchsperson einen Vergleich der beiden Objekte (das Vergleichsobjekt) erst dann anstellen kann, wenn sie eines der Objekte in eine kongruente räumliche Ausrichtung zum anderen Objekt (Standardobjekt) bringt - und nicht ihre Entscheidung aufgrund lokaler, salienter Eigenschaften des Objekts trifft. Ist das Vergleichsobjekt gespiegelt, so muß der Versuch eine Kongruenz herzustellen fehlschlagen, da keine Rotation zur Deckungsgleichheit der beiden Objekte führt. Diese „mismatch“-Prozedur drückt sich in der üblicherweise längeren Reaktionszeit für die gespiegelten Objekte. Shepard & Cooper (Shepard & Cooper, 1982)

veranschlagen in ihrem Modell der mentalen Rotation ca. 1/10s zusätzlich zu der Zeit, die für eine mentale Rotation aufgewendet werden muß. Der Verlauf der Reaktionszeitkurve für die Distraktoren hat meist den gleichen Verlauf wie die Kurve für die nicht gespiegelten Objekte - lediglich ist der Y-Achsenabschnitt um 100ms nach oben versetzt (siehe z.B. Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978)). Komplizierter wird der Verlauf der Kurve für die Distraktoren jedoch, wenn dreidimensionale Reize wie sie bei Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1971) verwendet wurden, den Versuchspersonen präsentiert werden. Da die Versuchspersonen in dieser Situation eher dazu neigen den Distraktor um eine beliebige Achse, anstatt an der angegebenen zu rotieren, resultieren aus dieser Strategie Reaktionszeitkurven, die nicht notwendigerweise ihr Maximum bei 180° haben. Diese Strategie kann vielmehr dazu führen, daß die Versuchspersonen „über den langen Weg“ (also über 180° hinaus) drehen, als sie üblicherweise bei zweidimensionalen Reizen tun. Folglich wird die Gruppe der Distraktoren häufig nicht mit ausgewertet, und die Feststellung, daß die Winkeldifferenz einen linearen Anstieg der Reaktionszeiten verursachte, bezieht sich demnach nur auf die identischen Objekte.

### **2.1.3 Das Kriterium einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit**

Shepard & Cooper (Shepard & Cooper, 1982) vermuteten dieses Maximum bei 17,5 ms/Grad (oder 55 bis 60°/s). Diese obere Schranke der Rotationsgeschwindigkeit erfuhr jedoch mit der Zunahme an veröffentlichter Literatur einen Trend immer höher auszufallen. Corballis, Zebroff, Shetzer & Butler (Corballis, Zbrodoff, Shetzer, & Butler, 1978) schätzten die maximale Ausführungsgeschwindigkeit auf 1034°/s (dies entspricht einer Steigung von 0.97ms/Grad). Für Takano (Takano, 1989) sind Rotationsraten von mehr als 1000°/s (also einer Steigung von 1ms/Grad) viel zu hoch, als daß sie einen mentale Rotationsprozeß abbilden könnten: „*[They] are too large to be considered as results of mental rotation.*“ (Takano, 1989, p. 35). Für Tarr und Pinker (Tarr & Pinker, 1989, p.256) gilt, daß „*a slope of 0.78 ms/degree (128°/s) ... [is] a hypo-*

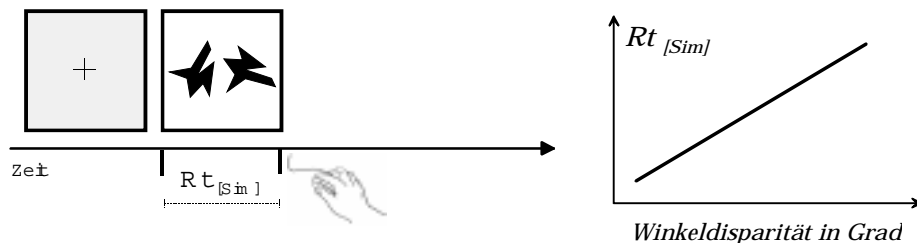
*thetical rate of rotation generally considered too high to reflect a mental rotation process.*“ Die Kontroverse um das [2.] Kriterium einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit macht deutlich, daß obwohl ein oberes Limit der Ausführungsgeschwindigkeit zwar unserem Verständnis eines bildlichen Transformationsprozesses entgegen zu kommen scheint, seine Festlegung jedoch, zumindest so lange wie wir nicht wissen welches seine Determinanten sind, willkürlich bleiben muß. Den Einfluß des verwendeten Paradigmas auf die Rotationsgeschwindigkeit zeigt der Exkurs 2.

## Der Einfluss verschiedener Paradigmen auf die Rotationsgeschwindigkeit

Cohen und Kubovy (Cohen & Kubovy, 1993) beschäftigten sich mit der Frage, ob Paritätsaufgaben stets den Prozeß der mentalen Rotation hervorrufen, oder ob die Art der Speicherung einer Repräsentation eines Objekts darüber entscheidet, ob eine mentale Rotation erforderlich oder nicht. Ist die Repräsentation eines Objekts an eine bestimmte Perspektive gebunden (engl. orientation-bound) sollte eine Paritätsentscheidung nur mit Hilfe einer mentalen Transformation der räumlichen Ausrichtung des Objekts möglich sein. Ist die Repräsentation hingegen frei von einer bestimmten Perspektive, so sollte die Vp unabhängig von der Ausrichtung des präsentierten Objekts eine Paritätsentscheidung in m ergleich schnell ausführen können.

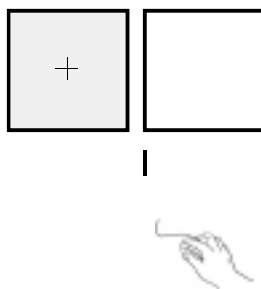
Cohen und Kubovy (Cohen & Kubovy, 1993) untersuchten nun die Bedingungen unter welchen es zu einer „orientation-free“ Repräsentation kommt und verwendeten für die Beantwortung dieser Frage drei verschiedene Paradigmen, die geeignet sind mentale Rotationsprozesse auszuüben. Als Objekte wurden Polygone oder Blockfiguren (bestehen aus einer 4x4 Matrix) verwendet. Beide Arten von Stimuli waren zweidimensional. Die Vp sollte entscheiden ob das Standardobjekt gleich dem Vergleichsobjekt ist oder ungleich – abgesehen von der Orientierung des Vergleichsreizes.

A: Simultan-Paradigma



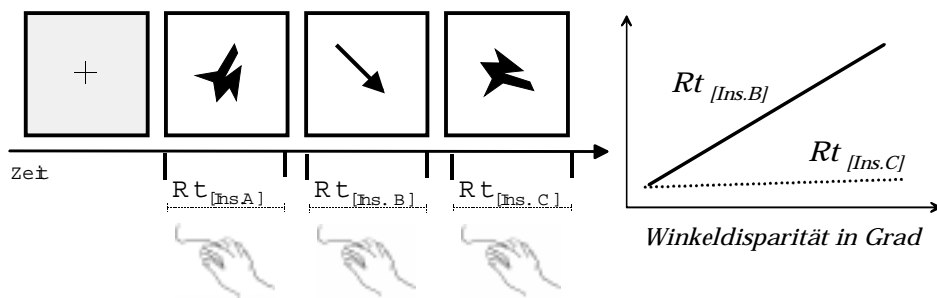
In Simultan-Paradigma (A) werden nach der Darstellung des Fixationskreuzes das Standard- und das Vergleichsobjekt simultan dargeboten. Es wird erwartet, daß die Reaktionszeit ( $Rt_{[Sim]}$ ) mit der steigenden Winkeldisparität der beiden Objekte steigt.

B: Sukzessiv-Paradigma



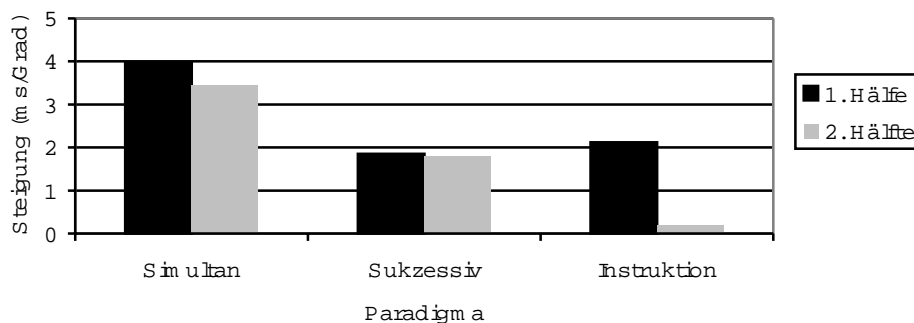
In Sukzessiv-Paradigma (B) wird zunächst der Standardreiz dargeboten, den sich die Vp merkt, und dann der Vergleichsreiz von der Vp angefordert. Auch hier sollte sich die Reaktionszeit ( $Rt_{[Suk.B]}$ ) von der Winkeldisparität abhängig zeigen.

C : Instruktions - Paradigm a



Das Instruktions-Paradigma (C) verlangt von der Vp, sich auf einen Instruktionsreiz hin, das Standardobjekt so rotiert vorzustellen, wie es der Instruktionsreiz anzeigt. Die Reaktion auf den Vergleichsreiz hin (gespiegelt/homol) sollte von seiner Orientierung unabhängig sein. Da der Instruktionsreiz immer eine valide Information über die Orientierung des zu erwartenden Vergleichsreizes darstellt, stellt sich die Zeit von Beginn der Darbietung des Instruktionsreizes bis zur Anforderung des Vergleichsreizes als abhängig von der angezeigten Winkelage dar.

In die Auswertung gelangten nur Latenzen für den Antworttyp „gleich“. Abweichend von den theoretisch erwarteten Resultaten, berichten die Autoren jedoch folgendes Befundmuster für die Steigung (Daten entnommen aus (Cohen & Kubovy, 1993)):



Der unterschiedlich hohe kognitive Aufwand (ausgedrückt in ms/Grad) für die Vp ist als Funktion der Paradigmen dargestellt. Demnach stellt sich das Simultan-Paradigma als deutlich schwerer dar als die übrigen Paradigmen. Während in der ersten Hälfte des Experiments eine ähnlich hohe Steigung beim Instruktions- und Sukzessiv-Paradigma zu finden ist, fällt sie im Instruktions-Paradigma völlig ab, und ist von Null nicht verschieden.

Ein Befund, der zunächst sehr überrascht. Bei der simultanen Darbietung der beiden Objekte, braucht kein Rückgriff auf die gespeicherte Version eines Objektes zu erfolgen - in Gegensatz zu den beiden anderen Paradigmen. Dennoch scheint es ungleich schwerer (da langsamer) eine richtige Entscheidung zu fällen. Ähnliche Ergebnismuster berichten Steiger und Yuille (Steiger & Yuille, 1983), Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1988) und auch Takano (Takano, 1989). Eine Erklärung für diese erwartungswidrige Wirkweise der verschiedenen Paradigmen kann an dieser Stelle nicht gegeben werden. Festzuhalten bleibt, daß die eben beschriebenen Versuchsanordnungen unterschiedliche Steigungen verursachen - ein Umstand, der zu bedenken sein wird, wenn an einer späteren Stelle Steigungen diskutiert werden, die in der Literatur als Beleg für die Beeinflussbarkeit der mentalen Rotationsgeschwindigkeit diskutiert werden.

Für die vorliegende Arbeit haben wir uns für eine Variante des Simultan-Paradigma entschieden. Hierbei wird ein hoch-überlemtre Reize (z.B. ein Buchstabe oder eine Zahl) alleine dargeboten. Dieser Reiz muss dann mit einer in Langzeitspeicher abgelegten, in aufrechter Orientierung befindlicher, Repräsentation verglichen werden. Hierfür eignen sich alphanumerische Zeichen besonders gut, da sie hoch-überlemtre Reize darstellen. Hier von eignet sich jedoch nur eine Teilmenge für die mentale Rotation, da es sich um Achsen- asymmetrische Zeichen handeln muss (z.B. „F“ oder „R“ oder „7“).

Neben der unterschiedlichen Wirkweise der von Cohen und Kubovy (1993) untersuchten Paradigmen fällt in dieser Studie auch der extreme Abfall der Steigung in der zweiten Hälfte im Instruktions-Paradigma auf. Die Autoren (Cohen & Kubovy, 1993) interpretieren diesen Befund so, daß die (nahezu) fehlende Steigung der Reaktionszeitkurve im Instruktions-Paradigma während der zweiten Hälfte des Experiments ein Beleg dafür ist, daß die Vpn innerhalb dieses Paradigmas eine Repräsentation des Objekts *erlernen*, die von einer bestimmten Perspektive unabhängig ist - und somit Zugriff auf die Repräsentation rotationsunabhängig erfolgt. Die von Cohen und Kubovy (1993) berichtete Studie, unterscheidet sich aber in einem zentralen Punkt von den üblicherweise berichteten Untersuchungen: Als Distraktoren (also die Menge der Objekte, die eine korrekte „ungleich“ Antwort provozieren sollten) wurden nicht nur gespiegelte Objekte verwendet sondern auch „perturbed objects“. 50% der Distraktoren bestanden aus „perturbed objects“. Die Konstruktion dieser Objekte erfolgte indem bei der Gruppe der Polygone ein zufälliger Arm des Objekts um einen bestimmten Betrag verlängert wurde. In der Gruppe der Blockfiguren wurde ein zusätzliches Rechteck an die Figur angefügt.

Bajric, Heil, Rösler & Hennighausen (Bajric, Heil, Rösler, & Hennighausen, Manuskript in Vorbereitung) vermuteten, daß die so erfolgte Zusammensetzung der Distraktoren einen entscheidenden Einfluß auf die Steigung hatte. In einer Replikation der Studie von Cohen und Kubovy (1993), an der nahezu 200 Versuchspersonen teilnahmen untersuchten sie den Einfluß der Menge der „perturbed objects“ innerhalb der Distraktoren. Eine Gruppe von Vpn erhielt das übliche Verhältnis von 100% gespiegelter Objekte - d.h. keine „perturbed objects“, alle korrekten „ungleich“ Antworten werden durch die gespiegelten Objekte hervorgerufen; eine zweite Gruppe 75% gespiegelter Objekte und 25% „perturbed objects“ ; die dritte Gruppe das von Cohen & Kubovy (1993) benutzte Verhältnis von 50%; eine vierte Gruppe erhielt nur 25%; und schließlich die fünfte Gruppe 0% gespiegelter Objekten innerhalb der Distraktoren d.h. alle korrekten „ungleich“ Antworten werden durch die „perturbed objects“ hervorgerufen.

Hintergrund für diese Replikation war folgende Idee: Wenn die Menge der Distraktoren zu 100% aus andersartigen Figuren besteht, so sollte für die Vp bei

keiner Aufgabe die Notwendigkeit bestehen eine mentale Rotation durchzuführen. Die Klassifizierung eines Objekts als Element einer Menge (in diesem Fall also als Element der Menge, der ungleichen Objekte) ist wie Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) zeigen konnten rotationsunabhängig. Ist auf der anderen Seite keine „Andersartigkeit“ zu erkennen, so ist die Antwort „gleich“ in jedem Fall korrekt - eine Rotation also ebenfalls nicht notwendig. Das Augenmerk dieser Studie war auf die Steigung der Reaktionszeitkurve gerichtet, die (äquivalent zu Cohen & Kubovy (1993)) von den „gleich“ Antworten erzeugt wird. Es wurde vermutet, daß sich die üblicherweise zu beobachtende Steigung bei der Gruppe mit 100% gespiegelter Negative-probes zeigt, und diese Steigung mit der Zunahme der „perturbed-objects“ weiter sinkt.

Die Ergebnisse konnten diese Idee jedoch nicht in Gänze stützen. Zwar zeigte sich ein reliabler Einfluß der Menge an anderen Objekte, der darauf hindeutet, daß je größer deren Anteil, desto kleiner die zu beobachtende Steigung. Der Einfluß war jedoch bei weitem nicht so groß, als daß er ein vollständiges Fehlen einer Steigung, wie sie von Cohen & Kubovy (1993) beobachtet wurde, erklären könnte. Zusammenfassend bleibt das inkonsistente Bild, daß das Instrukti- ons-Paradigma zwar die kleinste Steigung hervorruft - also von den Probanden am schnellsten bearbeitet wird, es aber andererseits (oder gerade deswegen) recht schnell zu einer Repräsentation der Objekte führt (orientation free representation), die einen rotationsunabhängigen Zugriff erlaubt .

#### **2.1.4 Das Kriterium der Paritätsentscheidung**

##### *[3.a] Minimale Winkeldisparität*

Mit der Schwellenwert Hypothese wird zum Ausdruck gebracht, daß die lineare Zunahme der Reaktionszeit mit der zunehmenden Winkeldisparität erst dann zu beobachten ist, wenn die Winkeldisparität einen bestimmten Betrag überschreitet. In der Tat haben die meisten in der Literatur zu findenden Untersuchungen Vielfache eines Winkelbetrags (z.B. 20°, 30° oder 45°) als Variation des Experimentalfaktors „Winkeldisparität“ verwendet. Daß eine mentale Transformation eines Objektes nicht erforderlich ist, wenn das Vergleichsobjekt 0° von



ihm verschieden ist, leuchtet ein. Ab welcher Winkeldisparität aber ist eine Transformation notwendig? Rossi und Collyer (Rossi & Collyer, 1986) überprüften die Schwellenwert Hypothese indem sie die von Shepard & Metzler (Shepard & Metzler, 1971) benutzten Zeichnungen von dreidimensionalen Objekte in 3° Vielfachen variierten. Sie realisierten also die Winkellagen 0°, 3°, 6° usf. bis 30°. Die Versuchspersonen waren wiederum aufgefordert eine Paritätsentscheidung zu treffen. Eine lineare Zunahme der Reaktionszeit mit der Winkeldisparität konnten Rossi & Collyer (Rossi & Collyer, 1986) erst ab einer Winkeldisparität von >15° feststellen. Kleinere Disparitäten waren nichtlinear. Die Autoren schlossen hieraus, daß eine mentale Rotation erst bei einer Winkeldisparität notwendig ist, bei der es den Versuchspersonen nicht möglich ist, aufgrund der Form beider Objekte, die in diesem Fall einfach zu vergleichen ist, zu entscheiden ob eines der Objekte gespiegelt dargestellt ist.

### [3.b] *Paritätsaufgabe*

Die zweite Randbedingung für das Kriterium der Paritätsentscheidung fußt auf der Annahme, daß eine Reaktion als Ergebnis einer Kette von Teilprozessen zustandekommt (siehe hierzu Donders, 1868). Eine detaillierte Diskussion über verschiedene Teilprozesse, die bei einer mentale Rotation beteiligt sind, wird im Zusammenhang mit Experiment 5 der vorliegenden Arbeit gegeben werden. An dieser Stelle soll zunächst einmal das Postulat von Corballis und & Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) genannt werden, der die Auffassung vertritt, daß die Klassifizierung eines Stimulus („character recognition“) *vor* der mentalen Rotation stattfinden muß und die mentale Rotation dann, und nur dann ausgeführt wird, wenn eine Paritätsentscheidung gefordert ist. Ist hingegen eine Benennungsaufgabe von der Versuchsperson gefordert, so sollte *unabhängig von der Winkeldisparität* des Stimulus von seiner Standardausrichtung keine mentale Rotation notwendig werden. Für die plausible Überlegung, daß zunächst der Stimulus klassifiziert und als Element einer Klasse erkannt werden muß - damit also die Standardausrichtung festgelegt werden kann und die Hauptachsen des Stimulus bestimmt werden können, bevor eine Transformation stattfinden kann, deuten die Befunde von Corballis und Nagourney (Corballis &

Nagourney, 1978). Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) baten ihre Versuchspersonen alphanumerische Stimuli als Zahlen oder Buchstaben zu klassifizieren. Die Stimuli waren wie in einer typischen mentalen Rotationsaufgabe in verschiedenen Winkellagen präsentiert worden. Die Hälfte der präsentierten Stimuli war gespiegelt dargeboten worden. Die Klassifizierungszeit war unabhängig von Winkellage. Der Entscheidungsprozeß, daß ein rotierter Stimulus - sei er auch gespiegelt präsentiert - ein Element aus der Klasse der Buchstaben oder ein Element aus Klasse der Zahlen ist, erweist sich als unabhängig von der Winkeldisparität zwischen der dargebotenen Orientierung und seiner Standardorientierung. Die Latenz für eine Paritätsentscheidung hingegen, zeigte wieder einen reliablen Einfluß der Winkeldisparität.

## 2.2 Psychophysiologische Korrelate der mentalen Rotation

*Im nachfolgendem sollen die Befunde zur neuronalen Implementierung der visuellen Vorstellung auf der Grundlage elektrophysiologischer Experimente diskutiert werden. Zentrales Leitthema ist der Versuch die mentale Rotation in ihrem Zusammenspiel mit anderen kognitiven Prozessen zu isolieren und ihre neuronalen Generatoren zu bestimmen. Die Kenntnis der beteiligten Gehirnareale und der Vergleich mit Befunden, die es erlauben, die visuelle Wahrnehmung neuronal zu verankern, sollen den Hintergrund für die Hypothese bilden, daß visuelle Vorstellung und visuelle Wahrnehmung kortikal sehr ähnlich, wenn nicht sogar teilweise identisch implementiert sein müssen.*

Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1996) untersuchten den von Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) berichteten Effekt mit Hilfe von Ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs). Hintergrund dieser Studie war die Frage, welche neuronalen Strukturen bei einer mentalen Rotation beteiligt sind und wie sich das zeitliche Zusammenspiel der beteiligten Teilprozesse darstellt. Grundlegende Annahme hierfür ist die postulierte Existenz spezialisierter neuronaler Zellverbände, die für einzelne Teilprozesse verantwortlich sind (Farah & Hammond, 1988; Kosslyn, 1994). Bisherige Untersuchungen mit Hilfe von EKPs zeigten eine deutliche Negativierung über *parietalen* Ableitorten, die mit zunehmender Winkeldisparität der beiden Objekte *anstieg* (siehe hierzu z.B. Peronnet und Farah (Peronnet & Farah, 1989), Rösler, Heil, Bajric und Hennighausen (Rösler, Heil, Bajric, Pauls, & Hennighausen, 1995); Rösler, Schumacher und Sojka (Rösler, Schumacher, & Sojka, 1990); Wijers, Otten, Feenstra, Mulder und Mulder (Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989)). Birbaumer, Elbert, Canavan und Rockstroh (Birbaumer, Elbert, Canavan, & Rockstroh, 1990; Rösler, Heil, & Roeder, 1997) konnten Belege für die Beziehung zwischen dem abgeleiteten Potential und den neuronalen Generatoren finden: Eine relative Zunahme der Negativierung im ereigniskorreliertem Potential wird durch eine Zunahme Aktivität der darunterliegenden neuronalen Strukturen verursacht. Psychologisches Korrelat dieser Zunahme ist die Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit. Dies im Auge, liegt der Schluß nahe, daß Zellverbände im parietalen Kortex für die Transformation von vorgestellten Objekten zuständig sind. Diese Erkenntnis würde den Erklärungsraum, was der Ver-

lauf der bisher beschriebenen Reaktionszeiten abbildet, sehr einschränken. Sie fußt aber auf einer grundlegenden Annahme, die vielleicht plausibel, aber dennoch nicht empirisch geprüft ist: Der Anstieg der relativen Negativierung, wie er bei der Bearbeitung von mentalen Rotationsaufgaben zu beobachten ist, spiegelt eine neuronale Aktivität wieder, die eindeutig auf die Transformation von Objekten zurückzuführen ist. Sind hingegen im gleichen Zeitraum andere, psychologisch relevante Prozesse aktiv, die eine eigene Verlaufscharakteristik haben, wäre das Resultat ein Potential welches die Summe einer Überlagerung zeitlich paralleler Prozesse abbildet. Damit aber wäre die Isolierung eines Gehirnnareals, welches die mentale Transformation leistet nicht mehr eindeutig, da das Potential nicht eindeutig einem Prozeß (hier: die mentale Rotation) zugeschrieben werden könnte.

Genau dieses Argument kann aber gegenüber Studien vorgebracht werden, bei denen aufgrund der verwendeten Objekte (Zahlen und Buchstaben) relativ kurze Verarbeitungszeiten realisiert wurden (z.B. Peronnet und Farah (Peronnet & Farah, 1989); Rösler et al. (Rösler et al., 1990); Wijers et al. (Wijers et al., 1989)). Wenn sich die Reaktionszeiten in einer Spanne von z.B. 500ms bis 1000ms bewegen, dann entsteht das Problem, daß in diesem Zeitbereich psychologisch relevante Prozesse, wie z.B. das Wahrnehmen eines handlungsrelevanten Reizes aktiv sind, die a priori unabhängig von mentaler Rotation sind, die aber auch im EKP sichtbar werden. Bei der hier in Frage kommenden Komponenten handelt es sich um eine Positivierung, die ihr Maximum im Bereich von 280 bis 600 ms nach der Darbietung eines Zielreizes hat (P300). In dieser Situation sind also in dem relevanten Zeitbereich von ca. 300-1000 ms nach der Darbietung des auf Parität zu prüfenden Objektes zwei gegenläufige Auslenkungen für das resultierende EKP verantwortlich: eine Positivierung, die aufgrund der Wahrnehmung eines handlungsrelevanten Reizes (hier also das Objekt, aufgrund dessen später eine motorische Antwort auszuführen ist) evoziert wird, und eine Negativierung, die als neuronale Antwort des Transformationsprozesses zu erwarten ist. Wijers et al. (Wijers et al., 1989) und auch Rösler et al. (Rösler et al., 1990) berichten Experimente, in denen eben solche Bedingungen realisiert waren. Die Darbietung der Zielobjekte (hier: Buchstaben) wurde von einer P300 begleitet,

deren Amplitude systematisch mit der Winkeldisparität zwischen den dargebotenen Buchstaben und seiner Normalorientierung ( $0^\circ$ ) variierte: in einem Zeitbereich von 400 bis 700 ms, wo die maximale Auslenkung zu beobachten war, war die Amplitude des Potentials um so kleiner je mehr der Buchstabe von  $0^\circ$  abwich. Wie läßt sich nun eine Variation einer Positivierung in Einklang mit den Ergebnissen von Birbaumer et al. (Birbaumer et al., 1990), oder Rösler et al. (Rösler et al., 1997) bringen, die bereits zeigen konnten, daß eine relative *Zunahme* der Negativierung den erhöhten Verarbeitungsaufwand widerspiegelt? Sowohl Wijers et al. (Wijers et al., 1989) als auch Rösler et al. (Rösler et al., 1990) interpretierten den Befund folgendermaßen: Eine P300 Komponente, wird von einer gleichzeitig aktiven parietalen Negativierung überlagert. Die Negativierung ist spezifisch für den Rotationsprozess, die P300 nicht. Die P300 hat vielmehr eine konstante Amplitude, da sie die Wahrnehmung von handlungsrelevanten Reizen widerspiegelt - unabhängig wie weit sie von  $0^\circ$  abweichen. Die Negativierung hingegen ist das Korrelat des Rotationsprozesses, dessen Amplitude mit zunehmender Winkelabweichung zunimmt. Indem Wijers et al. (Wijers et al., 1989) nun eine Subtraktion der Potentiale, bei denen die Buchstaben in  $0^\circ$  gezeigt wurden, von allen übrigen Winkelbedingungen vornahmen, konnten sie eine zunehmende Negativierung über den parietalen Ableitorten zeigen, die sie als genuin für das Korrelat der mentale Rotation beschrieben. Diese Interpretation der Befunde fußt aber auf der grundlegenden Annahme einer P300 *Konstanz*. Die Richtigkeit der Annahme wird jedoch fraglich, wenn man Untersuchungen in Betracht zieht, die die P300 als physiologisches Korrelat eines Kontext-Aktualisierungsprozesses sehen (Donchin & Coles (Donchin & Coles, 1988)). Danach wird die P300 als eine positive Auslenkung im Bereich von 280-600 ms gesehen, die über posterioren Arealen mit einem Maximum an Pz erreicht. Ihre Amplitude ist sowohl eine inverse Funktion der Wahrscheinlichkeit eines Reizes als auch eine inverse Funktion der subjektiv eingeschätzten Schwierigkeit der Aufgabe (Donchin & Coles (Donchin & Coles, 1988), Rockstroh (Rockstroh, Elbert, Lutzenberger, Birbaumer, & Roberts, 1988)). Es ist in der von Wijers et al. (Wijers et al., 1989) beschriebenen Experimentalsituation aber nicht auszuschließen, daß die Versuchspersonen die präsentierten Buchstaben hinsichtlich der Schwere der bevorstehenden Aufgabe

unterschiedlich bewerteten. Die mögliche subjektive Einteilung der Buchstaben, in die mit einer Rotationsaufgabe einhergehen (Winkeldisparität  $>0^\circ$ ) und in die ohne eine solche Aufgabe ( $0^\circ$ ) würde die beschriebene Subtraktionsmethode von Wijers et al. (Wijers et al., 1989) und Rösler et al. (Rösler et al., 1990) als ungerechtfertigt erscheinen lassen.

Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (Heil et al., 1996) versuchten nun, mit dem von Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) berichteten Effekt diese Grundlegende Annahme bei der Interpretation von ereigniskorrelierten Potentiale während einer mentalen Rotation mit relativ kurzen Verarbeitungszeiten zu überprüfen. Die prinzipielle Idee hierbei war es, das evozierte Potential als Antwort auf einen Klassifizierungsprozess und als Antwort auf einen Rotationsprozeß zu vergleichen. Für die Versuchsperson sollten alle Bedingungen die realisiert wurden gleich gehalten werden, sie sollte einmal den Zielreiz (F, R, 2, oder 5) klassifizieren oder auf seine Parität hin beurteilen. Die Klassifizierungsaufgabe bestand darin, zu entscheiden ob der Reiz eine Zahl oder ein Buchstabe ist - unabhängig von seiner Rotation oder Parität. Bei der Paritätsaufgabe hingegen sollte entschieden werden, ob der Reiz gespiegelt ist oder nicht - unabhängig davon ob es sich um einen Buchstaben oder eine Zahl handelt. In beiden Bedingungen wurden die Reize in Vielfachen von  $60^\circ$  (von  $0^\circ$  bis  $300^\circ$ ) Ausrichtungen präsentiert. Es wurde angenommen, daß die Klassifizierungsaufgabe eine P300 auslöst, die nicht von der Ausrichtung des Reizes abhängen sollte. Die Beurteilung ob der der Reiz aber gespiegelt ist oder nicht, sollte ebenfalls eine P300 auslösen - ihre Amplitude sollte aber, wie bei Wijers et al. (Wijers et al., 1989) und (Rösler et al., 1990) mit zunehmender Abweichung des Reizes von  $0^\circ$  *abnehmen*.

Die Ergebnisse zeigten einen klaren Befund. Während die Verhaltensdaten die Ergebnisse von Corballis und Nagourney (Corballis & Nagourney, 1978) bestätigen konnten, zeigte sich bei den ereigniskorrelierten Potentialen ein ebenso klares Bild: Die Klassifizierungsaufgabe evozierte ein parietales Potential (P300), dessen Amplitude nicht von der Ausrichtung des Zielreizes abhing. Sollte hingegen die Parität beurteilt werden, zeigte sich eine deutliche Abnahme der Amplitude der P300: Je größer die Abweichung von  $0^\circ$  desto kleiner die Amplitu-

de - bzw. größer die relative Negativierung. Die von Wijers et al. (Rösler et al., 1990; Wijers et al., 1989) vorgeschlagene Subtraktionsbildung mit dem Ziel die Netto-Negativierung der mentalen Rotation zu isolieren scheint demnach gerechtfertigt. Die neuronale Antwort auf die Wahrnehmung eines rotierten Reizes kann somit als konstant betrachtet werden und deswegen von allen Rotations-Bedingungen subtrahiert werden.

Der hieraus resultierende Befund, daß der Anstieg der Negativierung über parietalen Ableitorten durch einen zunehmenden Verarbeitungsaufwand der mentalen Rotationsaufgabe verursacht wird, deckt auch sich mit anderen Studien, die wesentlich längere Verarbeitungszeiten realisiert hatten (z.B. Rösler, Heil, Bajric, Pauls & Hennighausen (Rösler et al., 1995)). Rösler et al. (Rösler et al., 1995) verwendeten das Instruktions-Paradigma und baten ihre Versuchspersonen auf einen Ton hin, ein zuvor präsentiertes Objekt um einen bestimmten Winkelbetrag mental zu rotieren. Im Anschluß an diese 9 s lange Rotationsphase wurde der Vergleichsreiz dargeboten und die Versuchsperson mußte so schnell wie möglich die Antwort abgeben. Diese deadline-Variante der Reaktionsabgabe sollte dafür sorgen, daß die Probanden tatsächlich innerhalb der Rotationsphase rotierten, und nicht etwa erst dann, wenn der Vergleichsreiz zu sehen war. Rösler et al. (Rösler et al., 1995) berichten eine lang anhaltende Negativierung über dem parietalen Kortex, die während der Rotationsphase entstand, innerhalb derer keinerlei sonstigen Reize auf dem Darbietungsmonitor zu sehen waren. Die Amplitude der Negativierung variierte hierbei mit der Winkeldisparität für identische Objekte.

Die Auslenkung im EKP als Antwort auf die Darbietung des Instruktionsreizes hin, zeigte folgendes Bild: Die Amplitude war größer wenn der Instruktionston keine Rotation anzeigte ( $0^\circ$ ), und sie war kleiner wenn eine Rotation um  $60^\circ$  oder  $120^\circ$  gefordert war. Damit ist die von Heil et al. (Heil et al., 1996) vorgeschlagene Interpretation der abnehmenden P300 Amplitude als Überlagerung mit einer Negativierung, die allein auf die Rotation zurückzuführen ist, nicht mehr eindeutig: Wenn wir annehmen, daß die Versuchsperson die erwartete Schwierigkeit der mentalen Rotation in die zwei Schwierigkeitsklassen „leicht“ (d.h. alle  $0^\circ$ -Bedingungen) und schwer (alle übrigen Rotationsbedingungen), so

geht die Variation der P300 Amplitude nicht mehr in Gänze auf die Rotationsnegativierung zurück, sondern eben auch auf die Schwierigkeitsbeurteilung. Damit wird ein neuer Aspekt in der Interpretation der P300 Amplitude in einer mentalen Rotationsaufgabe mit relativ kurzen Verarbeitungszeiten eingeführt, dessen Bedeutung aus der Hiel et al. (Heil et al., 1996) nicht abzulesen ist. Auch Ullsperger, Gille, Pitschmann und Neumann (Ullsperger, Gille, Pietschmann, & Neumann, 1986) konnten zeigen, daß die angezeigte Schwierigkeit eine bevorstehenden Aufgabe einen bedeutenden Einfluß auf die Amplitude der P300 hat. Sie zeigten ihren Versuchspersonen mathematische Aufgaben, die in ihrer Schwierigkeit von 1 (leicht) bis 6 (schwer) variierten. Bevor die Aufgabe präsentiert wurde, zeigte man den Probanden einen Schwierigkeitsindex der bevorstehenden Aufgabe, der eine P300 auslöste. Es zeigte sich kein linearer Zusammenhang der Amplitude, der so ausgelösten P300, vielmehr ein U-förmiger: Die höchste Amplitude wurde sowohl bei einer als „sehr schwer“ als auch bei einer als „sehr leicht“ angekündigten Aufgabe beobachtet (Level 1 und 6); alle übrigen Schwierigkeitsangaben evozierten eine kleinere Amplitude der P300.

In einer neueren Studie von Bajric, Rösler, Heil und Hennighausen (Bajric, Rösler, Heil, & Hennighausen, 1999) untersuchte man daraufhin genau diesen Aspekt, der möglicherweise die Interpretation einer zunehmenden Negativierung über dem parietalen Kortex einschränken könnte. Bajric et al. (Bajric et al., 1999) realisierten das Instruktions-Paradigma in einer Studie mit reizevozierten Potentialen. Die Grundidee war es, die Prozesse der Klassifizierung, Vorbereitung auf eine bevorstehende Aufgabe und die mentale Rotation selbst zu separieren und damit direkt den Einfluß der angezeigten Schwierigkeit auf die P300 zu messen. Der bedeutende Unterschied zwischen dieser Untersuchung und der erwähnten Rösler et al. (Rösler et al., 1995) war, daß hier ein Instruktionsreiz gegeben werden sollte, der nur eine Schwierigkeitsangabe enthielt. In Rösler et al. (Rösler et al., 1995) war zunächst der Standardreiz gezeigt worden und hiernach die geforderte Rotation durch eine Ton angezeigt. Eine Differenzierung, welcher Anteil der neuronalen Antwort auf die Verarbeitung des Standardreizes hin evoziert wurde, und welcher von der darauffolgenden mentalen Transformation verursacht wird, konnte nur aufgrund der sehr langen Verarbeitungszeit ermittelt



werden. Der wesentlich kürzere Ausschlag im EKP auf die Wahrnehmung des Standardreizes (im Bereich von 280-600 ms) trennte sich somit von der anschließenden mentalen Rotation (deren Reaktionszeiten im Bereich von 1 bis 6 s lagen) zeitlich. Für kürzere Verarbeitungszeiten, mußte die Versuchsanordnung eine andere zeitliche Struktur aufweisen. Die Versuchsanordnung sah vor, daß den Versuchspersonen einen Schwierigkeitsindex wie in der Studie von Ullsperger et al. (Ullsperger et al., 1986) zu präsentieren, und anschließend einen Objekt zu vorzulegen, welches auf seine Parität hin beurteilt werden sollte. Die Versuchsperson sollte also auf die bevorstehende Aufgabe *vorbereitet* werden, indem man sie über die Orientierung des bevorstehenden Objektes informiert wurde. Der Schwierigkeitsindex war durch einen Pfeil repräsentiert, der die Orientierung des Objekts *valide* vorhersagte - *welcher* Buchstabe aber präsentiert wird, konnte die Versuchsperson zu diesem Zeitpunkt nicht wissen. Die Autoren erwarteten, **(a)** daß sich eine P300 als neuronale Antwort auf die Verarbeitung des Schwierigkeitsindex zeigen sollte. Auf die Variation der Amplitude dieser P300 war das Augenmerk gerichtet: die Unabhängigkeit von der angezeigten Schwierigkeit könnte dann als eine starke Evidenz für die Auffassung, daß es sich bei der Variation der P300 Amplitude *während* einer mentalen Rotation auf die zunehmende Negativierung handelt. **(b)** Es sollte sich weiterhin ein evoziertes Potential zeigen, welches als Beleg dafür gewertet werden konnte, daß die Versuchsperson die angezeigte Schwierigkeit tatsächlich *verarbeitet* - und nicht einfach ignoriert und dann erst bei der Darbietung des Zielbuchstabens die Transformation ausführt. Eine charakteristische Wellenform im EKP, die als eine Vorbereitung auf eine angekündigte Aufgabe interpretiert ist die sog. *contingent negative variation (CNV)*. Die CNV wird in der Literatur (siehe z.B. Brunia und Damen (Brunia & Damen, 1988); Frost, Neill und Fenelon (Frost, Neill, & Fenelon, 1988); Rockstroh, Elbert, Lutzenberger, Birbaumer und Roberts (Rockstroh et al., 1988); Ruchkin, Sutton, Mahaffey und Glaser (Ruchkin, Sutton, Mahaffey, & Glaser, 1986)) als eine kontinuierlich steigende Negativierung vom Beginn der Präsentation eines Ankündigungsreizes für eine Aufgabe, bis hin zur Präsentation der eigentlich Aufgabe. Interpretiert wird die CNV als eine Vorbereitung des Systems auf eine zeitlich später zu bearbeitende Aufgabe bzw. neu hinzukommende In-

formation. Eine solche CNV ist in diesem Typ des Instruktions-Paradigmas als eine Validierung des gesamten Vorgehens anzusehen. Ein Ausbleiben dieser Komponente bzw. die unsystematische Beziehung der Amplitude mit der angezeigten Schwierigkeit würde starke Zweifel an der Interpretation wecken, daß die Versuchspersonen tatsächlich sich auf die bevorstehende Aufgabe vorbereiten, indem sie die angezeigte Schwierigkeit verarbeiten. (c) Nachdem der Zielreiz gezeigt worden ist, sollte sich der bekannte Befund einer P300 mit einer abnehmenden Amplitude über parietalen Ableitorten zeigen (siehe die erwähnten Studien von Wijers et al. (Wijers et al., 1989); Rösler et al. (Rösler et al., 1990); Heil et al. (Heil et al., 1996)).

Die Ergebnisse zeigten folgendes Bild: Die drei zeitlich getrennten Phasen der Informationsverarbeitung (Schwierigkeitsanzeige, Vorbereitung, mentale Rotation) evozierten Potentialverläufe, die eine unterschiedliche Polarität, eine unterschiedliche Abfolge der Amplitude und eine unterschiedliche Topographie der Potentiale aufwiesen. Die erste Phase, in welcher ein Pfeil die zu erwartende Orientierung des Buchstabens anzeigte, wurde von einer P300 begleitet, deren Amplitude eine bimodale Verteilung aufwies: die angezeigte Schwierigkeit von  $0^\circ$  und  $45^\circ$  löste eine kleinere Amplitude als alle übrigen Winkellagen aus ( $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , und  $180^\circ$ ). Die dritte Phase, in welcher der Zielbuchstabe tatsächlich gezeigt wurde, evozierte ebenfalls eine P300, deren Amplitude eher einen linearen Trend aufwies: Die Amplitude war um so kleiner je mehr der Buchstabe von  $0^\circ$  abwich. Hierbei zeigte sich, daß  $0^\circ$  und  $45^\circ$  die größte aber keine voneinander signifikant verschiedene Amplitude auslösten; die nächst kleinere Amplitude wurde durch die  $90^\circ$  Bedingung ausgelöst; und schließlich zeigte sich die kleinste Amplitude für  $135^\circ$  und  $180^\circ$  (die sich ebenfalls nicht voneinander unterscheiden). Die dazwischen liegende Phase, in der die Versuchsperson sich auf die bevorstehende Aufgabe vorbereitet zeigte eine lang anhaltende Negativierung, die erst mit der Darbietung des Buchstabens endete.

Die Topographie der so ausgelösten Potentialverläufe zeigte folgende Bild: Die Verarbeitung des Schwierigkeitsindex wies eine symmetrisches parietales Maximum auf; die Phase der Vorbereitung auf den Zielbuchstaben ging mit einem Maximum an frontalen Elektrodenpositionen einher; und schließlich entwi-

ckelte sich nach der Darbietung Zielbuchstabens eine Potential, dessen Maximum über parietalen Hirnregionen, mit einem deutlichen Trend auf der rechten Hemisphäre.

Summarisch bleibt festzuhalten, daß die P300 nach der aufgezeigten Schwierigkeit nicht, wie zunächst angenommen, konstant ist. Sie zeigt vielmehr eine Variation ihrer Amplitude, die in ihrem Trend entgegengesetzt zu der vom Zielbuchstaben ausgelösten P300 Amplitude ist. Dieser Befund erlaubt zum einen eine Rechtfertigung für die von Wijers et al. (Wijers et al., 1989) und Rösler et al. (Rösler et al., 1990) vorgeschlagene und durchgeführte Subtraktionsmethode - ist aber ebenso ein klarer Hinweis darauf, daß die Verwendung relativ kurzer Verarbeitungszeiten ein großes Problem bei der Interpretation von EKP-Daten darstellen kann: Wenn zum einen die Einschätzung der Schwierigkeit der Aufgabe und zum anderen die Aufgabe selbst den gleichen Effekt auf die Amplitudenmodulation (mit entgegengesetzten Vorzeichen) haben, kann es somit zu einer gegenseitigen Aufhebung kommen. Die verbleibende Netto-Modulation würde dann keinen der tatsächlich vorliegenden Effekte widerspiegeln.

Die Studien von Heil et al. (Heil et al., 1996) und Bajric et al. (Bajric et al., 1999) stellen damit methodische Voraussetzungen, die es ermöglichen, die beobachtete relative Negativierung über parietalen Ableitorten als Abbild eines zunehmenden Verarbeitungsaufwands innerhalb der mentalen Rotation anzusehen. Dies trifft zumindest für Versuchsanordnungen zu, die aufgrund überlerner Reize relativ kurze Verarbeitungszeiten realisierten. Die Beteiligung des parietalen Kortex, der auch bei der visuellen Wahrnehmung beteiligt ist, deutet daraufhin, daß diese beiden Prozesse gemeinsame neuronale Strukturen nutzen (siehe z.B. Bisiach und Luzatti (Bisiach & Luzzatti, 1978); Farah, Soso und Dasheiff (Farah, Soso, & Dasheiff, 1992); Goldenberg, Poderka, Steiner, Willmes, Deecke (Goldenberg, 1989); Roland und Friberg (Roland & Friberg, 1985). Bevor ich auf weitere Einzelaspekte der neuronalen Grundlagen der visuellen Vorstellung und ihrer Gemeinsamkeit mit der visuellen Wahrnehmung eingehe, möchte ich zunächst kurz den Weg beschreiben, den ein visuelles Perzept bis zu seiner Identifizierung, d.h. Erkennung geht, darstellen.

Die durch die Retina aufgenommene optische Information wird über die Sehbahn zunächst zum Corpus geniculatum laterale und dann zur primären Sehrinde an der Medialseite des Okzipitallappens geleitet. Hierbei werden beide Gesichtshälften getrennt in die primäre Sehrinde der jeweils gegenüberliegenden Hemispähre projiziert. Das Erkennen von Gegenständen, Farben und räumlichen Beziehungen erfordert aber, daß die Information in sekundär visuellen Rindenfeldern weiter bearbeitet wird (Goldenberg, 1987). Diese finden sich in Anschluß an die primäre Sehrinde einerseits an der Unterseite des Gehirns im Übergang des Okzipitallappens zum unteren Temporallapen, andererseits an der Konvexität des Gehirns im Übergang zu Parietallapen (Goldenberg, 1987). Die erste Stufe der Bildanalyse besteht in der Umsetzung der Helligkeitsunterschiede des Sehbildes in Linien, Balken und Endpunkte, die zusammen ein „primary sctach“ (Marr, 1982) des Sehbildes formen. Dieser Prozeß findet vermutlich noch in der Sehrinde und in unmittelbar angrenzenden okzipitalen Rindenfeldern statt. Die Weiterverarbeitung der Primärskizze erfolgt parallel in mehreren anatomisch getrennten Abschnitten der sekundär visuellen Rindenfelder (Goldenberg, 1987). Aus der Primärskizze werden anschließend die Konturen von Objekten und weitere relevante Details extrahiert und differenziert. Marr (Marr, 1982) stellte sich vor, daß Punkte, kurze Linien und den Endpunkten längerer Linien sog. Landmarks zugewiesen werden, die dann nach Regeln zu kombinierten Elementen und zu Konturen zusammengefaßt werden. Nachdem die räumliche Tiefe und die Bewegung des Objekts - insbesondere Trennung von Eigenbewegung und Bewegung des Objekts (die Richtung und die Geschwindigkeit sind wenig relevant für das Erkennen (Goldenberg, 1987)) analysiert worden sind, entsteht eine „zweieinhalb dimensionale“ Skizze (Marr, 1982). In ihr ist das Perzept in einzelne Objekte und den Hintergrund gegliedert. Die Skizze ist nach Marr (Marr, 1982) btrachterzentriert, die die räumliche Orientierung der Oberflächen der einzelnen Objekte wiedergibt, aber keine Angaben über die Abstände zwischen den Objekten und ihrer Position im Raum enthält. Das Erkennen eines Objektes, d.h. seine Zuordnung zum Wissen, setzt nun aber voraus, daß eine objektzentrierte Beschreibung vorliegt - nur so können Objekte, die in der aktuellen Wahrnehmung zufällige räumliche Ausrichtungen haben können, unabhän-

gig von ihrer aktuellen Lage erkannt werden. Die Umsetzung aus einer betrachterzentrierten Strukturbeschreibung in eine objektzentrierte kann nach Meinung Marrs (Marr, 1982) anhand einer Heuristik erfolgen, die z.B. darauf beruht, daß die meisten Objekte als eine Zusammensetzung von verschiedenen Zylindern betrachtet werden können. Die Beschreibung des Verhältnisses der verschiedenen Achsen dieser Zylinder, muß dann in einem objektzentrierten Koordinatensystem erfolgen. Die Übersetzung des betrachterzentrierten ins objektzentrierten Koordinatensystems könnte dann durch eine „mentale Rotation“ des Objekts in seine Normallage erfolgen (Goldenberg, 1987; Marr, 1982).

Einen wesentlichen Unterschied zwischen der visuellen Vorstellung und der visuellen Wahrnehmung, neben der Tatsache, daß beide Prozesse unterschiedliche Inputs besitzen, berichtet Kosslyn (Kosslyn, 1988). Im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung, wo ein Gegenstand als Ganzes vorliegt, muß die Rekonstruktion eines Objekts aus dem Gedächtnis *schrittweise* erfolgen. Das Bild eines Buchstabens wird, so Kosslyn (Kosslyn, 1988), ähnlich sequentiell rekonstruiert, wie der Buchstabe während des Schreibens als Zeichen geformt wird. Kosslyn (Kosslyn, 1988) findet Hinweise darauf, daß die Generierung eines Vorstellungsbildes eine Funktion der funktional und anatomisch trennbaren Systeme „What“ und „Where“ ist (siehe hierzu Ungerleider und Mishkin (Ungerleider & Mishkin, 1982)). Hierbei erfolgt das Erkennen eines Objekts über die sog. „What“-Route. Eine Route, die occipito-temporale bis hin zu inferotemporalen Arealen involviert. Die „Where“-Route hingegen involviert occipito-parietale Areale, deren Endareal der posteriore parietale Kortex bildet. Während der „What“ Strang die Identifizierung eines Objekts zur Aufgabe hat, wird auf dem „Where“-Strang die räumliche Position eines Objekts in einem objektzentrierten Koordinatensystem zur Verfügung gestellt (Jeannerod, 1992).

Kosslyns (Kosslyn, 1983; Kosslyn, 1987) Überlegung ist nun, daß der Ort, wo sowohl eine objektzentrierte Darstellung eines visuellen Perzepts, als auch eine aus dem Gedächtnis konstruierte Darstellung eines Bildes, einem „inneren Auge“ in der Form einer Matrix dargeboten werden. Der sog. *visual Buffer* ist demnach der Ort, wo Informationen aus der Retina nach der oben geschilderten Analyse zusammenlaufen und somit visuelle Wahrnehmung stattfindet. Er ist

aber auch gleichzeitig die Struktur, die der aus dem Gedächtnis konstruierten Information die Eigenschaft verleiht, eine räumliche Ausdehnung zu haben: ein bildliches Vorstellungsbild. Kosslyn (Kosslyn, 1983; Kosslyn, 1987) nimmt an, daß die bildliche Vorstellung erst beim Akt des Vorstellens aus Informationen konstruiert werden, die im semantischen Gedächtnis gespeichert sind. Diese Informationen bestehen einerseits aus Beschreibungen von Bildteilen, andererseits aus Angaben über das Verhältnis der Teile zueinander. Eine ganze Reihe von Teilprozessen sind nötig, um daraus eine bildliche Vorstellung zu generieren. Kosslyn (Kosslyn, 1983; Kosslyn, 1987) ist der Meinung, daß bei der Inspektion und Bewertung eines bildlichen Vorstellungsbildes die gleichen Prozesse eingesetzt werden, die auch ein visuelles Perzept analysieren. Die bewußte Inspektion einer bildlichen Vorstellung findet nach Kosslyn (Kosslyn, 1994) im Arbeitsgedächtnis statt. Der visual Buffer, in dem visuelle Vorstellungen ihre „quasi perzeptuellen“ Eigenschaften erhalten, entspricht weitgehend dem visuospatialen Skizzenblock in Baddeleys Modell des Arbeitsgedächtnisses (Baddeley, 1986). Kosslyn nimmt an, daß der visual Buffer eine Struktur ist, die auch in der visuellen Wahrnehmung aktiv ist (siehe hierzu zusammenfassend Finke (Finke, 1980; Finke, 1985; Finke, Freyed, & Shyi, 1986); Kosslyn (Kosslyn, 1987)). Die Ähnlichkeit zwischen wirklicher und vorgestellter Wahrnehmung kommt demnach durch die gemeinsame neurologische Grundlage zustande.

Wie sollte man den monotonen Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Winkeldifferenz der beiden dargebotenen Stimuli erklären, ohne einen Verarbeitungsmodus des Gehirns anzunehmen, der sich grundlegend von dem eines Computers unterscheidet? Shepard und Metzler (1971) nahmen hierfür ein Verarbeitungsmodus an, der sich ganz ähnlich zu einer physikalischen Transformation eines Objekts verhielt: eine analoge Arbeitsweise also, die völlig inkompatibel zu der Arbeitsweise eines Computers zu sein schien. Die zu diesem Zeitpunkt noch junge Tradition "menschliches Denken als Verkörperung mathematischer Prinzipien zu sehen" (Gardner, 1989, S. 401) geriet mit diesen Ergebnissen in Konflikt: Rechnergestützte Transformationen geometrischer Objekte würden für eine Rotation um  $45^\circ$  kaum weniger Zeit benötigen als für eine Rota-

tion um 180°. Wenn aber Phänomene beschrieben werden, die mit anerkannten Methoden gewonnen wurden, die allen zugänglich sind (siehe die Forderung von Watson, 1913), die jedoch unvereinbar sind mit den traditionellen Paradigmen, dann stellen diese Phänomene Herausforderungen an die gültige Vorstellung über die Arbeitsweise des Gehirns dar. Kann diesen Phänomenen nur mit Modifizierungen und Ausweitungen bestehender Denkmodelle (Koriat & Norman, 1988) begegnet werden und führen diese Modifizierungen dazu, daß die bestehenden Modelle an Sparsamkeit und Ökonomie verlieren, so zwingen sie zu einem Paradigmenwechsel.

Bevor jedoch die Frage untersucht wird, ob nicht auch digitale (d.h. auch *propositionale*) Modelle ähnliche Daten vorhersagen würden, soll zunächst die Frage untersucht werden, was *analoge Informationsverarbeitung* bedeutet, und ob dieses Konzept ein notwendigen Verarbeitungsmodus des Gehirns darstellt, mit dem sich eine ganze Reihe von Untersuchungsbefunden *sparsamer* erklären

## 2.3 „Analoge Informationsverarbeitung“ - ein brauchbares Konzept?

*Wenn wir über analoge Informationsverarbeitung sprechen, so stellt sich zunächst die Frage worauf sich „analog“ eigentlich bezieht. Ist damit eine Gleichheit (im Sinne einer Analogie) mit anderen Vorgängen gemeint, oder ist damit das Gegenteil zu „digital“ gemeint, und hiermit ein prinzipiell unterschiedlicher Verarbeitungsmodus angesprochen? Neben dieser Frage soll aber in erster Linie der Unterschied zwischen analogen Repräsentationen und analogen Prozessen herausgestellt werden. Ziel dieser Darstellung ist es, den analogen Charakter eines Prozesses damit nachzuweisen, indem ein zweiter Prozeß, dessen „Analogheit“ als gesichert angenommen werden kann, mit ihm gekoppelt wird. Es sollte dann eine selektive Interferenz zu beobachten sein, die von einem „echten“ analogen Prozeß auf den vermuteten zweiten analogen Prozeß ausgeht.*

Einen ersten Zugang zu der Frage was analoge Informationsverarbeitung ist, bietet das in der Kognitionspsychologie gültige Informationsverarbeitungsparadigma (Klix, 1971). Dieses Paradigma versteht den Menschen als aktiven Informationsverarbeiter. Gehen wir über die zu enge Auslegung von Informationsverarbeitung als *Symbolverarbeitung* (Newell & Simon, 1972), so können wir unser Hauptaugenmerk auf folgende zwei Teilaspekte der oben aufgeworfenen Frage richten: I. Wie ist Information repräsentiert? II. Welches sind die Prozesse, die auf diesen Informationen operieren?

### 2.3.1 Wie ist analoges Wissen repräsentiert?

Für die analoge Repräsentation von Wissen bedeutet das: a) Was ist die Besonderheit der analogen Datenstruktur, die sie von z.B. propositionalen Datenstrukturen unterscheidet? Und weiter: b) Können wir die Prozesse, die auf analoge Datenstrukturen zugreifen, von Prozessen unterscheiden, die z.B. auf propositionales Wissen zugreifen unterscheiden?

Zu a)

Für den Begriff *Repräsentation* möchte ich die folgende allgemeine und weit gefaßte Definition von Zimmer (Zimmer, 1992) verwenden: "*Repräsentationen sind Gegebenheiten innerhalb eines (z.B. menschlichen) Informationsverarbeitungssystems, die für Gegebenheiten aus der Umgebung des Systems stehen.*" Da-



mit ist die Frage nach einem spezifischem *Format* einer Repräsentation noch nicht angesprochen. Wenn jedoch verschiedene Modalitäten, z.B. Bilder und Texte in einem Repräsentationssystem unterschieden werden sollen, so stellt sich die Frage wie sich die abzubildende Information der beiden Modalitäten unterscheiden. Zimmer (Zimmer, 1992) stellt hierzu weiter fest, daß das Format, in dem die Information repräsentiert werden soll, durch die Bestimmung des informativen Gehalts noch nicht festgelegt ist. Die Begriffspaare 'propositional' und 'analog' wurden häufig als Kandidaten für unterschiedliche Formate der Repräsentation diskutiert (z.B. Kosslyn, Flynn, Amsterdam, & Wang, 1990; Paivio, 1989). Damit ist auch schon der Kernpunkt der sogenannten "*imagery debate*" genannt, die (in der Hauptsache) um die Frage geführt wurde, ob es gerechtfertigt sei, verschiedene Formate für verschiedene Informationsmodalitäten (z.B. Bilder, verbale Informationen, Musik etc.) innerhalb des Repräsentationssystems anzunehmen (siehe dazu die Arbeiten der beiden Hauptkontrahenten Kosslyn (Kosslyn, 1980; Kosslyn, 1994; Kosslyn & Pomernatz, 1977) und Pylyshyn (z.B. Pylyshyn, 1973; Pylyshyn, 1981)). Obwohl die sog. Bild-Debatte noch nicht zum Abschluß gekommen ist und immer wieder in den Blickpunkt der Forschung gerät (siehe dazu z.B. | Sachs-Hombach, 1995) ist doch eine zunehmende Bereitschaft zu erkennen, mehrere Formate zu akzeptieren (Zimmer, 1992). Für die vorliegende Arbeit soll zunächst einmal, die innerhalb der *imagery debate* als 'schwache Annahme' gekennzeichnete Hypothese (Tye, 1991) genügen, daß innerhalb eines allgemeinen Repräsentationsformats 'propositional' und 'analog' die Eckpunkte eines Spektrums bilden, die je nach Anforderung einen verschiedenen Grad an "Analogheit" bzw. "Propositionalität" aufweisen.

Für die Beschreibung einer analogen Repräsentation führt Shepard (Shepard & Cooper, 1982; Shepard & Judd, 1976) die Unterscheidung zwischen einem *primären* und einem *sekundärem* Isomorphismus ein. Mit Isomorphismus ist hier eine umkehrbar eindeutige Abbildung einer Struktur auf eine andere gemeint. Das sogenannte "starke" Äquivalenzprinzip wird im primären Isomorphismus folgendermaßen zum Ausdruck gebracht: Beim primären Isomorphismus handelt es sich um eine Abbildung mit der Zielsetzung, die strukturellen - z.B. physikalischen - Eigenschaften eines Objekts in der Repräsentation zu erhalten. Wir haben es also genau dann mit einem primären

zu erhalten. Wir haben es also genau dann mit einem primären Isomorphismus zu tun, wenn die Struktur der Repräsentation Informationen über die Struktur des repräsentierten Objekts enthält. Dieses Verständnis von analoger Repräsentation entspricht in etwa auch der Definition von Sloman (Sloman, 1971): *"In an analogical system properties of and relations between parts of the representing configuration represents properties and relations of parts in a complex represented configuration, so that the structure of the representation gives information about the structure of what is represented."* (Sloman, 1971, 216 ff.). Sloman erweitert jedoch diese Definition um weitere Randbedingungen, die die Definition weiter konkretisieren. So finden wir etwa die folgende Eigenschaft einer analogen Repräsentation, die vielleicht banal aber auf der anderen Seite gleichermaßen einleuchtend ist: Eine analoge Repräsentation ist weniger gut geeignet "unmögliche Objekte" abzubilden. In einer propositionalen Repräsentation ist es z.B. möglich, einen Ausdruck wie "das runde Viereck" zu bilden. Dieser Ausdruck hat einen Sinn, auch wenn er auf keinen wirklich existierenden Gegenstand verweist. Das Äquivalent dieses Ausdrucks ist einer analogen z.B. bildhaften Repräsentation nicht erzeugbar. Weiterhin, so Sloman (Sloman, 1971, 172 ff.), ist die Verbindung zwischen den Objekten so beschaffen, daß kleine Änderungen in der Repräsentation normalerweise kleinen Änderungen in der Welt entsprechen. Wenn man mit Hilfe einer Karte die kürzeste Verbindung zwischen zwei Städten festlegen möchte, dann kann man dies, indem man zuerst die beiden Städte in der Repräsentation miteinander verbindet und dann diese Linie so lange verändert, bis sie mit den eingezeichneten Wegen übereinstimmt. Kleine Veränderungen bezüglich der Symbole in einer analogen Repräsentation entsprechen auf diese Weise normalerweise kleinen Änderungen in der Welt. Dies gilt für eine propositionale Repräsentation nicht. Hier bedeuten kleine Änderungen bei einem Symbol normalerweise großen Änderungen bei seinem Denotat. So ist die Änderung von "Realismus" in "Nationalismus" oder von "10" in "100" sehr kleine, die Änderung des Denotats hingegen sehr groß (Rehkämper, 1995). Schließlich beschreibt Sloman (Sloman, 1971) die syntaktischen Eigenschaften einer analogen Repräsentation. Beispielhaft wird hier die Situation beschrieben, in der syntaktisch verhindert werden muß, daß zwei Objekte in einer Analogen Repräsentation denselben Platz einnehmen. Beschränkungen innerhalb einer Problemsituation müßten

demnach durch die Art der syntaktisch *erlaubten Transformation* beschreiben lassen. Schließlich sind analoge Repräsentationen - statische wie dynamische - in bestimmten Problemsituationen ökonomischer als propositionale (Sloman, 1971). Man kann die Entfernung zwischen verschiedenen vorgestellten Objekten propositional in einer Art Entfernungstabelle ablegen. Soll ein weiteres, neues Objekt in dieser Repräsentation berücksichtigt werden, so verlangt dies nach einer Veränderung jedes Elements in der Tabelle, welches Bezug nimmt auf das neu hinzugekommene Objekt. In einer analogen Repräsentation hingegen wird das neue Objekt einfach in die vorhandene Repräsentation eingefügt - hierdurch wird sein Verhältnis zu den bereits vorhandenen Objekte in einem Schritt festgelegt.

Shepard (Shepard, 1975) führte parallel zum primären Isomorphismus eine weniger strenge Äquivalenzbeziehung zwischen Repräsentat und Repräsentandum ein - den sekundären Isomorphismus. Hier wird eine *funktionelle* Äquivalenz zwischen vorgestellten Objekten und Ereignissen einerseits und aktuell wahrgenommenen Objekten und Ereignissen andererseits postuliert. Es wird also im Gegensatz zum primären Isomorphismus nicht mehr eine Strukturäquivalenz zugrundegelegt - vielmehr sollen die *Beziehungen*, die zwischen externen Objekten bestehen, auch in den entsprechenden mentalen Repräsentationen auf dem Niveau funktioneller Äquivalenz gelten. An dieser Stelle möchte ich jedoch die Betrachtung des sekundären Isomorphismus nicht weiter führen - es soll zunächst die Feststellung genügen, daß im sekundären Isomorphismus die funktionelle Beziehung zwischen den Elementen einer analogen Repräsentation im Vordergrund stehen.

Die oben aufgeführten Definitionen analoger Repräsentationen berücksichtigen m.E. vorrangig formale Aspekte von Repräsentationssystemen, ohne eine Festlegung bezüglich eines Mediums in dem diese Repräsentationen instantiiert werden könnten. Die Frage nach einem geeigneten Medium aber, erscheint bei der bisher deutlich gemachten Unterschiedlichkeit von analoger und propositionaler Repräsentationen nicht zweitrangig. Kosslyn (Kosslyn, 1980; Kosslyn & Pomernatz, 1977) hebt in seinem Ansatz hervor, daß analoge Repräsentationen in einem *analogen Medium* als Oberflächenstrukturen instantiiert werden. Ein weiteres Merkmal seines Ansatzes ist dabei noch die Postulierung spezifischer

Prozeduren, die auf die analogen Datenstrukturen zugreifen. Hier finden wir, im Gegensatz zu den bereits erläuterten Ansätzen, also auch Prozesse, die spezifisch für die Verarbeitung solcher Daten sind. Genau diese Prozesse, die an ein ganz spezifisches Medium gebunden sind und auf spezifischen Daten operieren, werden für die vorliegende Arbeit einen empirische Zugang bilden, um das Verhalten des Informationsverarbeitenden Systems unter ganz bestimmten Umständen zu beobachten. Zunächst möchte ich aber noch einmal zu Kosslyn (Kosslyn, 1980; Kosslyn & Pomernatz, 1977) zurückkehren und folgende Erweiterung der beschreibenden Eigenschaften analogen Wissens hinzufügen. Kosslyn stellte das Postulat auf, analoges Wissen ist nur temporär analog - nämlich zu dem Zeitpunkt, zu dem es in dem speziellen Medium instantiiert ist. Die transitorische Eigenschaft analoger Repräsentationen drückt sich insbesondere in der Eigenschaft aus, daß Speicherung analoger Informationen nicht-analog ist - vielmehr werden solche Informationen in Form zweier getrennter, wahrscheinlich propositionaler Arten konstruiert. Sie verlieren also ihre Eigenschaft analog zu sein in dem Augenblick, indem sie nicht mehr in dem analogen Medium instantiiert sind, bzw. gewinnen diese wieder, wenn sie dort instantiiert werden (Kosslyn, 1980; Kosslyn & Pomernatz, 1977).

Abschließend möchte ich neben den bereits aufgeführten Eigenschaften, einen weiteren wichtigen theoretischen Beitrag hinzunehmen. Haugeland (Haugeland, 1981) untersucht, wann eine bestimmte Form der Repräsentation analog zu nennen ist. Sein Zugang hierzu ist, Repräsentationsformen danach zu unterscheiden, ob die Grundelemente aus denen die Repräsentation aufgebaut ist, *diskret* sind oder nicht. Hier wird also auf die *Kontinuirlichkeit* der Darstellung abgehoben. In einer analogen Darstellung gibt es keine Sprünge (Haugeland, 1981). Die Übergänge - z.B. in einer dynamischen Repräsentation - sind fließend, das Medium ist dicht. Ein populäres Beispiel hierfür ist die analoge Darstellung der Geschwindigkeit in einem Fahrzeug. Eine digitale Darstellung würde, so fein ihre Auflösung auch sein mag, stets Sprünge von einem zum nächst höherem Wert beinhalten. Aus dieser Eigenschaft folgert Haugeland (Haugeland, 1981), daß die Prozesse, die auf analoge Informationen zugreifen, niemals positiv sondern bestenfalls approximativ sind. Positive Prozesses, wie sie

bei propositionalem Wissen zu vermuten sind, liefern stets sichere Ergebnisse. Bei analogen Prozessen hingegen wird ein bestimmtes Ergebnis immer nur nahezu sicher geliefert. Hier erkennt man deutliche Parallelen zu Kosslyns (Kosslyn, 1980; Kosslyn & Pomernatz, 1977) Sichtweise, der ebenfalls spezifische Prozesse annimmt. Eine weitere Eigenschaft analogen Wissens führt Haugeland (1981) aus, die bisher von keinem der dargestellten Autoren ausgeführt worden ist: Analoge Repräsentationen sind nur analog in bezug auf bestimmte Dimensionen, d.h. auf bestimmte Eigenschaften zwischen den Objekten. Hier werden wiederum Parallelen zu Shepard (Shepard, 1975) sekundärem Isomorphismus deutlich.

Für die nachfolgenden Betrachtungen möchte ich an dieser Stelle die Kernpunkte des dargestellten Definitionsgebäudes analoger Repräsentationen folgendermaßen zusammenfassen:

- (1) Ziel einer analogen Repräsentation ist es die strukturellen Eigenschaften eines Objekts oder Sachverhaltes in der Umwelt abzubilden.
- (2) Interne Beziehungen eines Objekts oder Sachverhaltes in der Umwelt sind in einer analogen Repräsentation enthalten.
- (3) Das spezifische Format einer analogen Datenstruktur ist für spezifische Prozesse geeignet, die darauf optimal arbeiten können.
- (4) Analog abgebildete Beziehungen zwischen den Elementen sind explizit repräsentiert.
- (5) Die Eigenschaft "analog" einer Repräsentation ist transitorisch, die sich erst zum Zeitpunkt des Abrufes der Repräsentation einstellt.
- (6) Dynamische analoge Repräsentationen sind kontinuierlich und enthalten keine Sprünge zwischen zwei Zuständen.
- (7) Analoge Repräsentationen weisen in Abhängigkeit von ihrem Informationsgehalt einen unterschiedlichen Grad an "Analogheit" auf - d.h. sie sind nur auf bestimmten Dimensionen der Repräsentation analog.

Zu fragen bleibt, ob wir nach dieser Definition von einem eigenständigem Datenformat sprechen können, oder ob nicht möglicherweise ein allgemeines

Repräsentationsformat existiert, aus dem sich propositionale wie analoge Repräsentationen als Spezialfälle ergeben. Aus (7) folgt, daß Repräsentationen in Abhängigkeit von ihrem Informationsgehalt, einen unterschiedlichen Grad an "Analogie" aufweisen können. Lüer (Lüer, Werner, & Lass, 1995) weist im gleichen Zusammenhang daraufhin, daß strikt propositionale Repräsentationen dem Spezialfall von Repräsentationen entsprechen, die keinerlei Strukturinformationen über das Abzubildende in der formalen Struktur der Repräsentation enthalten. Demnach bildet das Begriffspaar 'analog' und 'propositional' keine echte Dichotomie. Es handelt sich hierbei eher um die Endpunkte eines gemeinsamen Spektrums. In Abhängigkeit vom Informationsgehalt einer Repräsentation sind auf diesem Spektrum Mischformen erlaubt, die jeweils den analogen oder propositionalen Charakter einer Repräsentation stärker betonen. Visuelle Vorstellungsbilder sind eine Form, Wissen auf analoge Art und Weise darzustellen. Man kann sie als Resultat einer strukturerhaltenden Abbildung verstehen, die die Eigenschaften der Dimensionen, Relationen und Operationen des Originals intrinsisch enthalten (siehe dazu Rehkämper, 1995).

Wenn die oben aufgeführten Eigenschaften (1) bis (7) einer analogen Repräsentation alle intrinsisch, also direkt durch die Repräsentation selbst gegeben sind und nicht erst inferiert werden müssen, dann müßten empirische Befunde auf die Qualität der Repräsentation zurückzuführen sein. Eigenschaften einer Repräsentation könnten dazu benutzt werden bestimmte Phänomene zu erklären. Die Beschaffenheit eines Repräsentationsformats wäre somit die Ursache der beobachteten Phänomene. Die Entscheidung darüber, ob neben einem propositionalem Format auch ein analoges Format innerhalb des Informationsverarbeitungssystems vorliegt - losgelöst von der Frage ob ein eigenes Format angenommen werden muß, oder ob es sich hier um Spezialfall eines allgemeinen Repräsentationsformats handelt - wird damit zu einer empirischen Aufgabe. Bevor nun die Phänomene, die m.E. eine analoge Datenstruktur nahe legen, aufgezeigt werden, soll zunächst einmal die Frage diskutiert werden, ob es überhaupt möglich ist, aufgrund eines empirischen Befundes auf ein spezifisches Format der Repräsentation eindeutig zu schließen.

Andersons (Anderson, 1978) Hauptargument gegen den Rückschluß von einem empirisch beobachteten Phänomen auf die zugrundeliegende Struktur der Repräsentation ist, daß prinzipiell nicht zwischen unterschiedlichen Repräsentationsformaten differenziert werden kann, da diese nicht direkt beobachtbar, sondern nur durch das Zusammenspiel mit geeigneten Prozessen beobachtbar sind. Durch Auswahl geeigneter Prozesse aber können Systeme, die auf unterschiedlichen Repräsentationsformaten basieren, das gleiche Verhalten zeigen. D.h. mit der Wahl geeigneter Prozesse, lassen sich verschiedene Arten von Formaten quasi simulieren - und damit nicht mehr unterscheiden. Wenn jedoch die Frage nach dem spezifischen Format prinzipiell nicht entscheidbar ist solange Verhaltensdaten als abhängige Variabel benutzt werden, so sollte die Frage nach spezifischen Prozessen in den Vordergrund rücken. Anderson (Anderson, 1978) selbst erklärt, daß der Begriff *Informationsverarbeitung* neben der Frage nach dem vorliegenden Datenformat zusätzlich die Frage nach den Prozessen, die auf diesen Daten operieren zu stellen sei:

*"My central thesis is that arguments concerning the representation of information have been misdirected. Any claim for a particular representation is impossible to evaluate unless one specifies the process that will operate on this representation. Arguments for or against a particular representation are only valid assuming a particular set of processes. These arguments are not valid assuming other processes. Phylyshyn has made the point that a theory must be considered as a representation plus process. As he writes: 'The appropriate subject of our analysis of representation should not be the representation per se but a representational system consisting of the pair (representation, process)'."*

### **2.3.2 Wie wird analoges Wissen verarbeitet?**

*„If we take a cube and label one side top, another bottom, a third front, and a fourth back, there remains no form of word by which we can describe to another person which of the remaining sides is right and which left. We can only point and say here is right and there is left, just as we should say this is red and that is blue.“*

William James (1890; his italics; zit. nach Corballis, 1996)

James (in Corballis & McMaster, 1996) drückt in diesem Zitat den Kerngedanken eines *analogen Prozesses* aus, indem er darauf hinweist, daß wir nicht in der Lage sind, die Unterscheidung von rechts und links innerhalb einer beschränkten Umwelt *symbolisch* zu führen. Wir müssen auf unsere eigene links/rechts Asymmetrie referenzieren, wenn wir diese Problem lösen wollen. Corballis (Corballis & McMaster, 1996) führt den Gedanken weiter fort, indem er auf die Unmöglichkeit verweist, einem System, welches keine Vorstellung von einer links/rechts Asymmetrie besitzt, eine genau Instruktion zu geben, wie z.B. ein *rechter* Handschuh hergestellt wird - das Resultat einer solchen Instruktion wäre zweifellos zufällig ein rechter oder linker Handschuh (Corballis & McMaster, 1996, p.9). Wenn wir aber annehmen, daß die Diskriminierung von Spiegelbildern eine Referenz zu unserer eigenen links/rechts Asymmetrie benötigt, wird der Prozeß der mentalen Rotation verstehbar. Mit einer mentalen Rotation stellen wir sicher, daß das Objekt in Bezug auf unsere eigenen Körper ausgerichtet wird. Diese Beschreibung einer mentalen Rotation von Corballis (Corballis & McMaster, 1996) legt eine funktionelle Übereinstimmung der mentalen mit der *physikalischen* Rotation sehr nahe. Genau in diesem Sinne möchten auch Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982) den *analogen Charakter* eines mentalen *Rotationsprozesses* verstanden wissen. Er bildet einen Vorgang ab, der nicht anders dargestellt werden kann, als mit einem Hinweis auf tatsächliche physikalische Vorgänge. Welches aber sind die Eigenschaften eines physikalischen Vorgangs, die ihn *analog* werden lassen?

Die physikalische Rotation eines Objekts beschreibt eine Trajektorie, auf der alle zwischen der Start- und Endposition liegenden *Zwischenstufen* von dem Objekt durchlaufen werden. Die Grundidee bei der Interpretation des Reaktionszeitverlaufs bei einer mentalen Rotation war nun anzunehmen, daß dies auch bei einer vorgestellten Rotation der Fall ist. Alle Zwischenstufen werden kontinuierlich von dem vorgestellten Objekt durchlaufen. Die Trajektorie kann somit als eine Serie von zwischenliegenden räumlichen Ausrichtung des Objekts auf seinem Weg zur Endposition angesehen werden, die eine 1:1 Beziehung zu der physikalischen Trajektorie besitzen. D.h. der lineare Anstieg der Reaktionszeit mit



zunehmender Winkeldisparität der identischen Objekte wurde als Hinweis gewertet, daß die Vergleichzeit für zwei Objekte, die in der Orientierung A und C gezeigt werden eine additive Kombination der Vergleichszeit für die Ausrichtungen A und B und die beiden Ausrichtungen B und C ist. Es wird somit zunächst unterstellt, daß eine Rotation von A nach C auch die dazwischen liegende Ausrichtung B passiert. In einer trickreichen Versuchsanordnung von Cooper und Shepard (Cooper, 1976) konnte ein direkter Hinweis hierfür geliefert werden. Die Versuchspersonen lernten hier zunächst die verschiedenen Ausrichtungen von geometrischen Objekten und ihren Spiegelbildern. Nachdem die individuellen Rotationszeiten pro Versuchsperson ermittelt waren, bat man die Versuchspersonen, ein Objekt um einen bestimmten Winkelbetrag mental zu rotieren. Zu einem bestimmten, für die Versuchsperson nicht vorhersehbaren Zeitpunkt, präsentierte man nun ein Objekt, dessen Parität beurteilt werden sollte. Die Reaktionszeitmessung wurde nun gestartet. Die Ausrichtung des Vergleichsobjekts war die kritische Größe: er konnte kongruent zu der aufgrund der individuellen Rotationsgeschwindigkeit berechneten Ausrichtung sein oder ein hiervon abweichende Orientierung haben. Bot man ein kongruentes Objekt dar, so war die Latenz für die Beurteilung seiner Parität *unabhängig* davon, wie weit die Orientierung von der gelernten abwich. Bot man hingegen ein Objekt dar, welches leicht von der berechneten Position abwich, so stieg die Latenz mit der Zunahme dieser Abweichung. Diese Prozedur sei an einem Beispiel verdeutlicht: Angenommen eine Versuchsperson rotiert die gelernten Objekte mit einer Geschwindigkeit von ca.  $1.5^\circ/\text{ms}$ . Zu einem Zeitpunkt  $t_0$  läßt man sie das Objekt um  $120^\circ$  rotieren. 60ms später ( $t_1$ ) präsentiert man ein Objekt, welches um  $90^\circ$  rotiert ist, und läßt sie die Parität beurteilen. In dieser kongruenten Bedingung reagiert die Versuchsperson mit einer Latenz von 300ms. Diese Latenz zeigt sich nun für alle gelernten Abweichungen von  $0^\circ$ . Zeigt man hingegen ein Vergleichsobjekt, welches leicht von der gelernten Orientierung abweicht, so zeigen sich Latenzen, die abhängig von dem Ausmaß dieser Abweichung sind. Die Variation des Zeitpunktes  $t_1$  konnte zeigen, daß die Versuchsperson *scheinbar alle* zwischen der Start- und Endposition liegenden Orientierungen durchläuft. Dies werteten Cooper und Shepard (Cooper, 1976) als starken Beleg, daß die mentale Rotation deswegen

einen *analogen* Prozeß abbildet, weil auch in der Vorstellung scheinbar alle Zwischenstufen durchlaufen werden.

Die Operationalisierung eines analogen Prozesses erfolgt hier also durch das Kriterium einer *kontinuierlichen* Veränderung der Lage eines Objekts. Ziel dieser Darstellung war es, Hinweise dafür zu liefern, daß wir, wie Anderson (Anderson, 1978) bereits zeigen konnte, nicht analoge Repräsentation von z.B. propositionalen Repräsentationen unterscheiden können - die Prozesse, die auf verschiedenen Repräsentationsformaten hingegen operieren, lassen sich mit geeigneten Versuchsanordnungen unterscheiden. Cooper und Shepard (Cooper, 1976) konnten zeigen, daß der Prozeß der mentalen Rotation ein vorgestelltes Objekt um  $\alpha^\circ$  transformiert, indem  $\alpha^\circ/2$  „durchlaufen“ werden. Damit ist in gewisser Weise zwar der kontinuierliche Charakter dieses Prozesses nahegelegt, die Eigenschaft einer „Bewegung“ hingegen bleibt davon unberührt. Damit ist ausgedrückt, daß zwar das Kriterium für einen analogen Prozeß - nämlich die Kontinuität, zwar erfüllt ist, eine Gleichheit zur einer physikalischen Rotation, die ja gerade durch die Bewegung gekennzeichnet ist, ist damit jedoch nicht gezeigt. Im folgenden soll eine Arbeit von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) diskutiert werden, die einen ganz direkten Zugang zu der Frage eröffnet, ob die mentale Rotation, neben ihren kontinuierlichen Charakter auch die Eigenschaft einer „Bewegung“ abbildet. Wenn gezeigt werden kann, daß die Bewegung im vorgestellten Raum ein wesentlicher Aspekt der mentalen Rotation ist, sollte es möglich sein, die Frage zu untersuchen, ob diese Bewegung mit einer gleichzeitig sichtbaren Bewegung interferiert. Die mögliche Interferenz zweier gleichzeitig operierender analoger Prozesse würde ein wesentliches Wirkprinzip der mentalen Rotation offenlegen: Möglicherweise wird die mentale Rotation von neuronalen Strukturen bereitgestellt, die auch für die Wahrnehmung einer Bewegung zuständig sind.

### 2.3.2.1 Die Interferenz zweier analoger Prozesse

Finke (Finke, 1989) postuliert nach einer gründlichen Diskussion vieler Ergebnisse zur mentale Rotation das „principle of transformational equivalence“. Darin wird eine allgemeine Beziehung zwischen der mentalen Rotation und der tatsächlichen physikalischen Rotation ausgedrückt, aus der sich ableitbare Vorhersagen über den Wirkmechanismus der mentale Rotation ergeben. Finke (Finke, 1989) postuliert:

*“Imagined transformations and physical transformations exhibit corresponding dynamic characteristics and are governed by the same laws of motion.” (Finke, 1989, p.93)*

In diesem Postulat drückt sich, fast 20 Jahre nach der Arbeit von Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971), das Verbindungsglied zwischen der mentalen und physikalischen Rotation aus: es ist die *Bewegung*, die beiden Arten von Rotation innewohnt, und gleichzeitig den wesentlichen Wirkmechanismus darstellt. Finke (Finke, 1989) entwickelte dieses Postulat bei einer Zusammenstellung von empirischen Ergebnissen, im Gegensatz zu dem eher informationstheoretischen Weg, der in den vorherigen Kapiteln 1.3.1 und 1.3.2. der vorliegenden Arbeit gewählt wurde.

Eine wesentliche Implikation, die aus dem Postulat der Transformations-Äquivalenz folgt ist, daß die mentale Rotation auf einem Objekt als Ganzes operieren sollte - so, wie auch bei der physikalischen Rotation eines Körpers, der Körper als Ganzes gedreht wird. Daneben sollte die auch die Komplexität, ausgedrückt z.B. in der Anzahl von Ecken und Kanten eines Körpers, keinen Einfluß auf die mentale Rotation haben. Cooper (Cooper, 1975) konnte in einer Untersuchung, bei der Objekte verwendet wurden, die sich neben der unterschiedlichen Winkeldisparität auch in ihrer Komplexität unterschieden. Der Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Winkeldisparität war nicht von der Komplexität der Reize abhängig. Cooper und Podgorny (Cooper, 1976) konnten weitere Evidenz dafür finden, daß die Versuchspersonen nicht nur einzelne Teile einer Figur

rotierten um sie von ihrer Spiegelbildversion zu unterscheiden, sondern daß die ganze Figur rotiert wird. Sie verwendeten, wie bereits bei der Untersuchung von Cohen und Kubovy (Cohen & Kubovy, 1993) berichtet, neben der Spiegelversion auch Objekte als Distraktoren, deren *Ähnlichkeit* zu den Standardobjekten variiert wurde. Cooper und Podgorny (Cooper, 1976) fanden, daß die Reaktionszeit-Winkelfunktion nicht nur von der Komplexität, sondern auch davon unabhängig war, wie ähnlich die Distraktoren den Standardobjekten waren. Dies kann als weitere Evidenz gesehen werden, daß die Transformation nicht an einzelnen, herausragenden Features eines Objekts vorgenommen wird, sondern vielmehr an der ganzen Figur. Hätten hier die Versuchspersonen nur Einzelteile rotiert, so hätte die Geschwindigkeit der mentalen Rotation mit der Ähnlichkeit der Distraktoren mit den Standardobjekten steigen müssen.

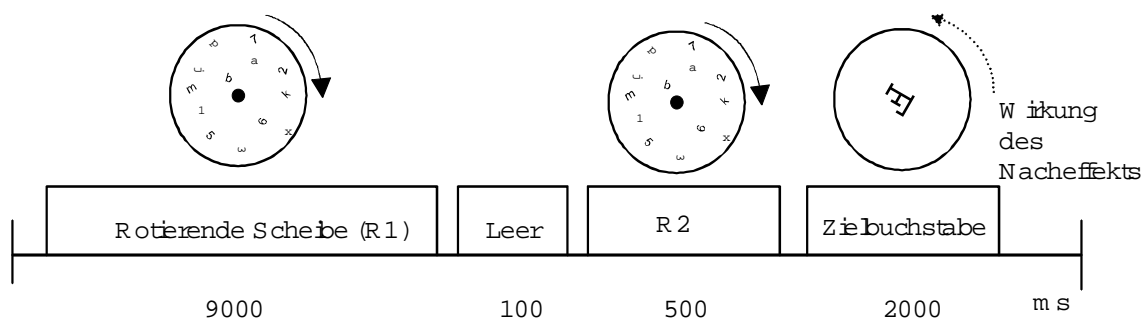
Eine weitere Implikation, die aus dem Prinzip der Transformations-Äquivalenz folgt ist, daß die mentale Rotation ebenso wie die physikalische *kontinuierlich* sein sollte. Eine Evidenz hierfür konnten, wie bereits berichtet, Cooper und Shepard (Cooper, 1976) erbringen. Die stärkste Implikation jedoch, die aus dem Prinzip von Finke (Finke, 1989) folgt, ist der *Bewegungsaspekt*. Neben einer Rotation der ganzen Figur und dem Nachweis der Kontinuität der Rotation, bildete die Bewegung, die eine auf die Parität zu prüfende Figur ausführt die stärkste Analogie zu einer physikalischen Rotation.

Die Grundidee von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) war es eine physikalische Bewegung mit einer mentalen Rotation zu kombinieren. Wenn es sich zeigen ließe, daß die physikalische Bewegung eines Reizes, mit der mentalen Rotation *interferiert*, wäre damit die postulierte Analogie zwischen physikalischer und mentaler Rotation stark untermauert. Die Einzelheiten des Vorgehens von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) finden sich im Exkurs 3.

### Exkurs 3

#### Die Interferenz von Bewegung und mentaler Rotation: Ist Bewegung ein Grundprinzip der mentalen Rotation?

Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) untersuchten die Wirkung einer realen physikalischen Rotation auf die mentale Rotation. Sie erzeugten vor jeder Paritätsentscheidung einen Bewegungsnacheffekt. Die Versuchsperson schaute für mehrere Sekunden auf eine rotierende Scheibe. Die Scheibe war mit einer Textur versehen und drehte sich mit einer konstanten Geschwindigkeit mit oder gegen den Uhrzeigersinn. Der so erzeugte Bewegungsnacheffekt sollte sich bei der Darbietung des statisch dargebotenen Zielreizes zeigen - den die Versuchspersonen auf seine Parität untersuchen sollten. Der zeitliche Verlauf der Aufgabe ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Die Zielbuchstaben waren in  $60^\circ$  Vielfachen rotiert. Die Rotationsgeschwindigkeit der Texturscheibe war zweifach variiert: 25 vs. 60 U/min. Die Darbietungsdauer des Zielbuchstabens war ebenfalls zweifach variiert: 90 vs. 2000 ms. Die Latenz wurde von Darbietungsbeginn des Zielbuchstabens an gemessen.

Als Folge der Wahrnehmung einer rotierenden Scheibe, zeigte der Bewegungsnacheffekt eine paradoxe Wirkung auf die Wahrnehmung eines statischen Zielreizes: die Versuchspersonen berichteten, der Zielbuchstabe scheine sich in die entgegengesetzte Richtung der Scheibe zu drehen, ohne seine Position zu ändern. Die so induzierte reine Bewegung ohne Positionsänderung wirkte sich auf die Latenz folgendermaßen aus:

Die Reaktionszeiten verschoben sich in die Richtung des Nacheffekts. Es zeigte sich neben dem bekannten Anstieg der Reaktionszeit mit dem Anstieg der Winkelparität, daß das Maximum der Reaktionszeit-Winkel-Funktion, das üblicherweise bei  $180^\circ$  liegt, sich verschiebt. Es verschob sich zu  $120^\circ$ , wenn der Nacheffekt mit dem Uhrzeigersinn wirkte. Wirkte der Nacheffekt gegen den Uhrzeigersinn, so zeigte sich das Maximum bei  $240^\circ$ . Bei einer Darbietungsdauer von 2000 ms wirkte der Nacheffekt stärker, als bei einer Darbietungsdauer des Zielbuchstabens von nur 90 ms. Die Geschwindigkeit der Scheibenrotation zeigte keinen Einfluß.

Diese Ergebnisse scheinen eine überzeugende Evidenz für das von Fiske (Fiske, 1989) aufgestellte Prinzip der Transformations-Äquivalenz zu sein: Die (Schein)Bewegung des Zielbuchstabens interagiert mit der mentalen Rotation. Daraus folgt, daß eine mentale Rotation tatsächlich das zu transformierende Objekt in Bewegung versetzt und dann mit der Scheinbewegung des Zielreizes „kollidiert“. Weiterhin scheint auch die von Kosslyn (Kosslyn, 1994) angenommene Gemeinsamkeit der visuellen Wahrnehmung und der visuellen Vorstellung zu existieren: Zum mindesten an einer Stelle der Verarbeitungskette innerhalb der visuellen Wahrnehmung, wie auch der visuellen Vorstellung scheint es dem nach Prozessmodul zu geben, die von beiden Arten der Verarbeitung gleichsam genutzt werden. Nur so scheint sich die Interferenz des Bewegungsnacheffekts auf die mentale Rotation erklären zu lassen.

Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) diskutieren drei Alternativerklärungen, die ohne die Annahme einer direkten Bewegung des Vorstellungsbildes auskommen - ohne letztlich zwischen diesen Alternativen entscheiden zu können. Sie sind Gegenstand im Text der folgenden Darstellung.

Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) diskutieren folgende Alternativerklärungen für die gefundene Interaktion des Bewegungsnacheffekts mit der mentalen Rotation:

- *Die Periphere Hypothese*

Diese Erklärungsmöglichkeit sieht vor, daß der Input um einige Grad in Richtung des Nacheffekts rotiert wahrgenommen wird. Die Wirkung des Nacheffekts wird damit auf recht frühe Verarbeitungsstufen der Wahrnehmung vorgelagert, und die weitere Verarbeitung, insbesondere die mentale Rotation, operiert dann auf dem durch den Nacheffekt weniger oder mehr gedrehten Stimulus. Hieraus ergibt sich, daß die Reaktionszeitfunktion sich *gegen* die Richtung des Nacheffekts verschoben sein sollte. Da die nachfolgenden Verarbeitungsstufen auf dem durch den Nacheffekt beeinflussten Input operieren, sollte sich keine Interaktion der beiden Bewegungsmuster zeigen.

- *Die analoge Bewegungshypothese*

Wenn wir annehmen, daß die mentale Rotation mit einer konstanten Geschwindigkeit durchgeführt wird, und der Bewegungsnacheffekt selbst auch eine Geschwindigkeit besitzt, mit der der Zielreiz gegen die Drehrichtung der zuvor gesehenen Scheibe rotiert wird, so sollten sich nach dieser Hypothese beide Geschwindigkeit *kombinieren*. Im kongruenten Fall sollte dann eine Nettogeschwindigkeit resultieren, die höher ist als im inkongruentem Fall. D.h. hier sind es die beiden Bewegungen, die miteinander interagieren, und daher den Bewegungscharakter der mentalen Rotation nachweisen.

- *Die Strategie Hypothese*

Hier wird weder eine „fehlerhafte“ Wahrnehmung des Zielreizes, noch eine Kombination der beiden Rotationsgeschwindigkeiten angenommen, sondern vielmehr eine Änderung der Strategie. Die Versuchspersonen richten demnach ihre Rotationsrichtung mit der Richtung aus in der der Nacheffekt wirkt. D.h. wirkt der Nacheffekt gegen den Uhrzeigersinn, so wird auch die mentale Rotation in diese Richtung durchgeführt. Die üblicherweise ökonomischere Strategie, immer den kürzeren Weg zu bevorzugen,

und damit maximal bis  $180^\circ$  zu rotieren, würde damit durch die Wirkung des Nacheffekts beeinflusst. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wird also z.B. ein um  $120^\circ$  rotierter Buchstabe, unter der Bedingung, daß der Nacheffekt im Uhrzeigersinn wirkt, in dieselbe Richtung gedreht - und somit um  $240^\circ$  mental rotiert. Mit der komplementären Wahrscheinlichkeit würde der selbe Zielreiz in die übliche Richtung (hier: gegen den Uhrzeigersinn) um  $120^\circ$  gedreht.

Mit der Strategie-Hypothese läßt sich somit die gefundene Interaktion der beiden Rotationsrichtungen ohne eine Annahme der Bewegung innerhalb der mentalen Rotation erklären. Die Wahrscheinlichkeit einer Änderung der ökonomischen Strategie ist eine Funktion der Winkeldisparität *und* der Richtung des Nacheffekts.

Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) konnten nun zwischen diesen drei Erklärungsmodellen nicht unterscheiden, da alle drei die gefundene Interaktion vorhersagen. Der entscheidende Durchbruch für das Verständnis der mentalen Rotation, die als Paradebeispiel einer analogen Informationsverarbeitung gilt, wäre sicherlich der Nachweis der Richtigkeit der analogen Bewegungshypothese gewesen. Die folgende Untersuchung von Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1997) sollte helfen, die Wirkung des Nacheffekts eingehender zu untersuchen, und möglicherweise zwischen den drei Hypothesen besser entscheiden zu können.

Heil et al. (Heil et al., 1997) überprüften im ersten Experiment die periphere Hypothese, indem sie die Versuchsanordnung von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) übernahmen. Es wurde jedoch eine andere Winkelabstufung verwendet. In  $30^\circ$  Vielfachen, statt  $60^\circ$  wie bei Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) wurde die Winkeldisparität variiert. Hiermit sollte eine verlässlichere Schätzung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit ermöglicht werden. Sowohl die analoge Bewegungshypothese als auch die Strategiehypothese besagen, daß es zu einer Beeinflussung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit kommen sollte. Wenn die mentale Rotationsrichtung mit der Richtung des Nacheffekts übereinstimmt, sollte es zu einer höheren Rotationsgeschwindigkeit

kommen, als wenn die beiden Richtungen divergieren - hier sollte eine langsamere Rotationsgeschwindigkeit resultieren. Die periphere Hypothese hingegen sagt eine *Verschiebung* des Maximums voraus, *ohne* einer Änderung der Rotationsgeschwindigkeit vorherzusagen. Die Steigung der Reaktionszeitfunktion sollte die Beantwortung dieser Frage erlauben.

Zunächst wurde der von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) beschriebene Effekt der Interaktion der Richtung des Nacheffekts mit der Orientierung des Zielreizes repliziert: Wirkte der Nacheffekt im Uhrzeigersinn fand sich das Maximum der Reaktionszeiten bei 150°. Im komplementären Fall verschob sich das Maximum zu 210°. Nun wurden die Steigungen der Reaktionszeiten vor und nach dem jeweiligem Maximum geschätzt. Es wurde immer dann eine signifikant langsamere Geschwindigkeit beobachtet, wenn die beiden Bewegungsrichtungen nicht kongruent waren.

Dieses Befundmuster spricht nach Meinung von Heil et al. (Heil et al., 1997) eindeutig gegen die periphere Hypothese. Nach dieser hätte es zu einer Verschiebung der Maxima *ohne* eine Änderung der Geschwindigkeiten kommen müssen. D.h. die beobachtete Wechselwirkung der beiden Rotationsrichtungen kann nicht darauf zurückgeführt werden, daß es aufgrund des Bewegungsnacheffekts zu einer Veränderung der vertikalen Ausrichtung des Zielreizes schon auf der retinalen Ebene kommt. Die analoge Bewegungshypothese, die im ersten Experiment schon bestätigt zu sein scheint, konkurriert jedoch mit der Erklärung, daß es in Abhängigkeit der Orientierung des Zielreizes und der Richtung des Nacheffekts zu einer Veränderung der mentalen Rotationsrichtung kommt. Wenn man nun die Wahrscheinlichkeit einer Änderung der Lösungsstrategie als Funktion der beiden Richtungen auffaßt, so Heil et al. (Heil et al., 1997), könnten die unterschiedlichen Nettogeschwindigkeiten auf eine gewichtete Mittelung der mentalen Rotation bei unterschiedlichen Orientierungen zurückgehen. Deshalb wurden die Versuchspersonen im zweiten Experiment explizit aufgefordert, eine *bestimmte* Rotationsrichtung vorzunehmen. Durch dieses Vorgehen sollte es möglich sein, die Hypothese zu überprüfen, daß gleiche Winkel, unabhängig von der Rotationsrichtung (mit oder gegen den Uhrzeigersinn) mit der gleichen Geschwindigkeit bearbeitet werden. D.h. ein Zielreiz mit der Ausrichtung von 120°



sollte gleich schnell bearbeitet werden können, wie der gleiche Zielreiz mit einer Ausrichtung von  $240^\circ$  (was  $-120^\circ$  entspricht), wenn die Interaktion der beiden Bewegungsrichtungen auf eine probabilistische Veränderung der Lösungsstrategie zurückgeht. Das zweite Experiment beruht jedoch auf der Annahme, daß die Instruktion („drehe bitte in einer bestimmte Richtung“) auch befolgt wird. Um diese Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, wurde versucht, die Differenz des Verarbeitungsaufwands zwischen der von den Versuchspersonen meist bevorzugte (Prinzip des kürzesten Wegs) Strategie und der vom Versuchsleiter erwünschten, so klein wie möglich zu halten. Deswegen wurden nur die Winkellagen realisiert, bei denen aufgrund der gewählten Winkelabstufung diese Differenz möglichst klein ist:  $120^\circ$  bis  $240^\circ$  in  $30^\circ$  Schritten.

Neben dem zu erwartenden Winkeleffekt zeigte sich eine deutliche Erhöhung der durchschnittlichen Rotationsgeschwindigkeit ( $596^\circ/\text{s}$ ) wenn der Nacheffekt in die gleiche Richtung ging, wie die vorgegebene mentale Rotationsrichtung. Es zeigt sich hingegen eine deutliche Abnahme dieser Geschwindigkeit, wenn beide Richtungen inkongruent sind ( $303^\circ/\text{s}$ ). Das Befundmuster aus dem zweiten Experiment konnte demnach in Richtung der analogen Bewegungshypothese interpretiert werden. Eine Interpretation im Sinne der Strategie Hypothese hingegen war nicht möglich, da diese in etwa vergleichbare Geschwindigkeiten sowohl für den kongruenten als auch den inkongruenten Fall vorhersagt.

In einem dritten Experiment untersuchten Heil et al. (Heil et al., 1997) die Grundlage für das zweite Experiment: wie sicher kann angenommen werden, daß die Instruktion von den Versuchspersonen wirklich befolgt wird? Eine systematische Veränderung der Bereitschaft die Instruktion zu befolgen mit z.B. der dargebotenen Orientierung des Zielreizes, könnte demnach den Ausschluß der Strategie Hypothese nicht rechtfertigen. In Experiment drei wurden die Versuchspersonen direkt nach der Paritätsentscheidung nach der tatsächlichen mentalen Rotationsrichtung gefragt. Tatsächlich fand sich ein Hinweis auf die Strategie Hypothese: Die Versuchspersonen wählten bei einer vertikalen Ausrichtung des Zielreizes von  $150^\circ$  den kürzesten Weg in 82% der Fälle, wenn *kein Nacheffekt* induziert worden war. Im Fall einer Inkongruenz von Nacheffekt und vorgegebener Rotationsrichtung, wählten sie diesen Weg nur in 58% der Fälle. Der kurze

Weg wurde jedoch zu 92% gewählt, wenn eine Kongruenz der Richtungen vorlag. Mit diesen Angaben war es nun möglich, die Nettogeschwindigkeiten aufgrund der Reaktionszeiten zu berechnen, die um die Richtung der mentalen Rotation bereinigt waren. Hier stellte sich nun heraus, daß auch mit dieser Korrektur eine deutliche Interaktion der beiden Richtungen zu beobachten ist - sie aber zweifellos von einer Änderung der Strategie mit beeinflußt wird.

Festzuhalten bleibt, daß die Richtung des Nacheffekts mit der Richtung der mentalen Rotation in der Weise interagiert, daß (a) eine Kombination der Geschwindigkeiten stattfindet, die in einer Beschleunigung bei vorliegender Kongruenz und in einer Verzögerung im Fall einer Inkongruenz, resultieren, und (b) der Bewegungsnacheffekt die Lösungsstrategie beeinflußt - diese kann zwar nicht die beobachtete Interaktion vollständig erklären, muß jedoch bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Mit den berichteten Untersuchungen von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und von Heil et al. (Heil et al., 1997) ist m.E. ein deutlicher Hinweis darauf gefunden worden, daß zum einen die mentale Rotation einen kontinuierlichen Verarbeitungsprozeß darstellt, bei dem die zwischen der Start- und Endorientierung des Zielreizes liegenden Zwischenorientierungen durchlaufen werden, und weiterhin, die *Bewegung* ein wichtige Eigenschaft des Prozesses ist. Heil et al. (Heil et al., 1997) sprechen hier von einer Kombination der Geschwindigkeit der mentalen Rotation und der des Nacheffektes. Dieses Befundmuster deutet damit deutlich in Richtung des von Finke (Finke, 1989) aufgestellten Postulats einer Transformationsäquivalanz der mentalen mit einer physikalischen Rotation - dabei dürfen jedoch m.E. einige Unzulänglichkeiten des Nacheffektsparadigmas nicht unterschätzt werden. Das nachfolgende Kapitel richtet daher sein Hauptaugenmerk auf diese Unzulänglichkeiten und versucht, die Grundlage für ein neues Paradigma zu erläutern, mit dessen Hilfe weitere Argumente für die analoge Bewegungshypothese erbracht werden sollen, die Gegenstand des empirischen Teils der vorliegenden Arbeit sein sollen.

## 2.4 Entwicklung einer Arbeitshypothese

*Grundlage für die zu entwickelnde Arbeitshypothese ist die Überlegung, daß die physikalische Bewegung eines Körpers auf der einen Seite einen analogen, kontinuierlichen Vorgang darstellt und auf der anderen Seite das eigentliche Wirkprinzip einer mentalen Rotation häufig mit einer vorgestellten Bewegung in Verbindung gebracht wird (Finke, 1989). Daraus entsteht die Idee, beide Vorgänge zeitlich miteinander zu koppeln, indem während der mentalen Rotation eine physikalische Rotation zu sehen ist. Untersuchungen von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und Arbeiten unserer eigenen Arbeitsgruppe (Heil et al., 1997) zeigen, daß dies ein erfolgversprechender Zugang ist. Das hierbei eingesetzte Paradigma erweist sich jedoch als problematisch, da es nicht erlaubt, einige wesentliche Parameter zu kontrollieren bzw. zu manipulieren. Im Anschluß an die Diskussion dieser Problematik wird ein neues Paradigma vorgestellt werden, welches es erlauben soll, die Interferenz zweier Prozesse zu untersuchen.*

Der theoretische Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit lag in dem Versuch Gründe dafür anzuführen, warum die mentale Rotation einen *analogen Prozeß* abbildet. Es sollte dabei deutlich werden, daß hierbei möglicherweise analoge *Repräsentationen* verwendet werden, diese aber zum einen nur unzureichend in einem Reaktionszeitparadigma entdeckt werden können (siehe hierzu Anderson, 1978), zum anderen jedoch, und daß sei auch hier hervorgehoben, sie nicht der zentrale Betrachtungsgegenstand sind. Vielmehr sollte deutlich werden, daß der Nachweis eines analogen *Bewegungscharakters* der mentalen Rotation bisher noch nicht gelungen ist. Der kontinuierliche Bewegungscharakter aber ist, seit der ersten Beschreibung der mentalen Rotation, implizit immer als *der* wesentliche Mechanismus dieses kognitiven Prozesses genannt worden. Zentrales Indiz hierfür war zunächst der lineare Anstieg der Reaktionszeit mit der Winkeldisparität des Zielobjekts (siehe hierzu Shepard & Metzler, 1971). Die anschließende Diskussion in der einschlägigen Literatur, ob nicht auch propositionale Modelle einen ähnlichen Reaktionszeitverlauf zur Folge haben würden (siehe hierzu die Zusammenfassung von Tye, 1991), machte deutlich, daß dieses Indiz nicht für einen gesonderten Verarbeitungsmodus, wie er für die analoge Informationsverarbeitung unterstellt wird, hinreichend ist. Cooper (Cooper, 1976) konnte im weiteren Verlauf in ihrer Untersuchung zeigen, daß es sich bei der mentalen Rotation zumindest um einen *kontinuierlichen* Prozeß handelt, bei dem sequentiell Zwischenergebnisse produziert werden. Dies war ein starker Hinweis für die An-

nahme, daß die mentale Rotation quasi eine innere Simulation eines physikalischen Prozesses ist. Damit war jedoch zunächst nur die Kontinuität des Prozesses nachgewiesen, die nur ein Teilaspekt der physikalischen Rotation ist. Die Betrachtung einer realen, physikalischen Rotation eines Körpers macht schnell deutlich, daß die *Bewegung* ein weiteres, wesentliches Merkmal der Transformation eines Körpers von einer in eine andere räumliche Ausrichtung ist.

Eine besondere Wendung in der Erkenntnisgeschichte der mentalen Rotation, war die Überlegung, sie direkt mit einer realen Bewegung zu kombinieren. Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) waren in der Lage, mittels des Bewegungsnacheffekts einen weiteren wichtigen Beitrag dazu zu leisten, den Wirkmechanismus der mentalen Rotation als ein Analogon einer physikalischen Rotation beschreiben zu können. Heil et al. (Heil et al., 1997) weisen zwar auf eine Einschränkung dieser Beschreibung hin, indem sie den Beitrag eines Strategiewechsels mit ins Kalkül ziehen, und eine strenge Additivität der beiden Bewegungsgeschwindigkeiten bezweifeln, können jedoch die von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) entdeckte Interferenz im wesentlichen replizieren.

Hieraus leitet sich der Gedankengang ab, daß der Nachweis eines *analogen Prozesses* dann gelingen kann, wenn seine Interferenzneigung auf einen zweiten, gleichzeitig aktiven, *relevanten* analogen Prozesses zurückgeführt werden kann. Die Logik des Interferenzparadigmas würde dann darin bestehen, die mentale Rotationsgeschwindigkeit als zentrales abhängiges Maß unter dem Einfluß eines zweiten, analogen Prozesses zu beobachten. Was aber macht die *Relevanz* eines zweiten analogen Prozesses aus? Welche Eigenschaften muß dieser Prozeß haben, damit er a) eindeutig eine Bewegungscharakteristik hat - denn nur diese kommt in Frage, wenn es darum geht, den Zusammenhang zwischen einer realen Bewegung und einer (vermuteten) kognitiv simulierten Bewegung nachzuweisen, und b) in der Lage ist, die mentale Rotationsgeschwindigkeit zu beeinflussen? Aufgabe des nachfolgenden Kapitels ist es darzulegen, daß eine *Kreisbewegung des Zielreizes*, während er auf Parität geprüft wird genau diese Kriterien erfüllt. Wenn es sich also zeigen läßt, daß die Wahrnehmung einer Bewegung die mentale Rotationsgeschwindigkeit beeinflußt, ist damit ein

wegung die mentale Rotationsgeschwindigkeit beeinflusst, ist damit ein Nachweis erbracht, daß zumindest Teilprozesse der mentalen Rotation einen ähnlichen Bewegungscharakter besitzen, wie die tatsächlich wahrgenommene Bewegung. Grundgedanke des Interferenzparadigmas ist, daß sich zwei Prozesses aufgrund *ähnlicher* Verarbeitungsmodi beeinflussen. Grundbedingung hierfür ist es also eine größtmögliche Ähnlichkeit beider Prozesse herzustellen. Da wir die Eigenschaften eines kognitiven Prozesses nicht beeinflussen können, bleibt die Aufgabe die Parameter eines physikalischen Prozesses so einzustellen, daß sie den vermuteten Parametern der mentalen Rotation weitestgehend entsprechen.

#### **2.4.1 Entwicklung eines neuen Paradigmas**

Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) konnten zeigen, daß die mentale Rotation nicht beeinflusst wird, wenn die Zielreize auf einem rotierenden Hintergrund präsentiert werden. Während der Präsentation der Zielreize bewegte sich das Graumuster des Hintergrunds kreisförmig mit oder gegen den Uhrzeigersinn. Die fehlende Interaktion der mentalen Rotation mit der Bewegungsrichtung des Hintergrunds wurde von den Autoren als Hinweis gedeutet, daß der zuvor von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und Heil et al. (Heil et al., 1997) untersuchte Effekt auf einer Verarbeitungsstufe stattfindet, die den bewegungssensitiven Zellen nachgeschaltet sein muß. Sie untersuchten weitere Möglichkeiten die mentale Rotationsgeschwindigkeit mit Parametern zu variieren, die auf einer relativ frühen Stufe der Verarbeitung wirksam sind: Helligkeit, Farbe, Textur, Bewegung und Tiefenwahrnehmung. Es zeigte sich kein Hinweis darauf, daß die Rotationsgeschwindigkeit mit solchen Einflußgrößen zu beeinflussen ist. Dies wurde wiederum als Evidenz für die Annahme gewertet, daß die mentale Rotation ein Prozeß ist, der sich nach der Stufe der frühen visuellen Verarbeitung abspielt. Die Autoren fanden jedoch die von Corballis und McLaren [Corballis, 1982] beschriebene Interferenz, wenn der Zielreiz tatsächlich während seiner Präsentation seine vertikale Orientierung änderte. Der Stimulus wurde dabei in schneller Abfolge von einer Orientierung zu einer um

10° weiter rotierten Ausrichtung dargeboten. Für den Betrachter entsteht dabei der Eindruck eines sich pendelförmig bewegenden Zielreizes, *ohne* dass eine Rückbewegung sichtbar war. D.h. der Reiz schien immer wieder in eine Richtung zu pendeln. Das Ausmaß der Pendelbewegung betrug 10°. Die Latenz war kürzer, wenn der Zielreiz sich in die gleiche Richtung zu bewegen schien, wie die mentale Rotationsrichtung als wenn die beiden Richtungen entgegengesetzt waren. Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) vermuteten deswegen, daß es auf einer relativ späten Ebene der Verarbeitung ein Verarbeitungsmodul gibt, welches sowohl von der visuellen Wahrnehmung als auch von der mentalen Rotation genutzt wird. Die Autoren waren jedoch auch nicht in der Lage, die Strategie-Hypothese bei dieser Versuchsanordnung auszuschließen. Auch hier hätte eine Beeinflussung der Rotationsrichtung mit der gezeigten Bewegungsrichtung des Zielreizes den beobachteten Interferenzeffekt hervorrufen können.

Allen bisher geschilderten Untersuchungen zur mentalen Rotation und deren Zusammenwirken mit einer physikalischen Rotation (Corballis & Blackman, 1990; Corballis & McLaren, 1982; Heil et al., 1997; Jolicoeur & Cavanagh, 1992; Shepard & Judd, 1976) ist gemein, daß der auf Parität zu prüfende Zielreiz während der Präsentation seine vertikale Orientierung änderte. D.h. während der Phase der mentalen Rotation verändert der Zielreiz seine Winkeldisparität zu seiner Normalausrichtung. Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und Heil et al. (Heil et al., 1997) induzierten einen Nacheffekt, dessen Wirkung darin bestand, daß der Zielreiz paradoxerweise zu kippen schien, ohne seine Position zu verändern. Corballis und Blackman (Corballis & Blackman, 1990) präsentierten einen Uhrzeiger, der eine kurze Bewegung ausführte, und hiernach eine rechts/links Entscheidung getroffen werden sollte. Schließlich präsentierten Jolicoeur und Corballis (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) einen Zielreiz, der sichtbar für die Versuchsperson eine kurze Kreisbewegung ausführte, während die Paritätsentscheidung zu treffen war. D.h. in allen Untersuchungen war der Kerngedanke, einen Zielreiz in *Bewegung* zu versetzen, gleichzeitig wurde damit aber auch seine vertikale Orientierung verändert. Wie können wir aber sicher sein, daß die *Bewegung* ursächlich für die beobachtete Interferenz ist - die Veränderung der vertikalen Orientierung während der mentalen Rotation könnte hierfür allein

verantwortlich sein. Die folgende (sehr vereinfachte) Vorstellung soll diesen Gedanken explizit machen: Wenn die mentale Rotation auf einer bildlichen Vorstellung operiert, und diese aus einem Perzept gebildet wird, welches seine vertikale Orientierung stetig, mal in Richtung der mentalen Rotation verändert und mal ihr entgegengesetzt, dann erscheint eine Interaktion dieser beiden Bewegungen nicht mehr so überraschend. Im Gegenteil, es wäre doch sehr überraschend, wenn das informationsverarbeitende System zu Beginn der mentalen Rotation das vorliegenden Perzept als Grundlage für die Transformation nehmen würde, und „unbeeindruckt“ von der Veränderung des Perzepts die Aufgabe abarbeiten würde. D.h. das Perzept, welches im kongruenten Fall *physikalisch* eine vertikale Orientierung annimmt, die *psychologisch* noch zu berechnen ist, würde dann unbeachtet gelassen. Es erscheint doch sehr viel wahrscheinlicher, daß das System eine dynamische Repräsentation des Zielreizes aufbaut, die *kontinuierlich* das vorliegende Perzept als Grundlage für die auszuführende Transformation nimmt. Eine kontinuierlich ablaufende mentale Rotation, wie sie von Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) vermutet wird, und von Cooper und Shepard (Cooper, 1976) eindrucksvoll nachgewiesen worden ist, würde dann von einer Änderung der Orientierung des Perzepts profitieren: Es müssen dann weniger Zwischenstadien berechnet werden, da ja die physikalische, sichtbare Orientierung des Zielreizes schon Zwischenergebnisse dieser Berechnung bereithält. Hieraus resultiert eine *höhere Rotationsgeschwindigkeit*. Im inkongruenten Fall jedoch, müssen aufgrund der Änderung der vertikalen Orientierung in die „falsche“ Richtung, Zwischenstadien möglicherweise doppelt berechnet werden, bzw. die mentale Rotation muß „warten“ bis der entgegengesetzt wirkende physikalische Prozeß in seiner Wirkung nachläßt, oder ganz verschwindet. Hieraus resultiert eine Verzögerung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit. Ein nach diesem Prinzip arbeitende mentale Rotation würde zweifelsfrei in einer Interaktion der Bewegungsrichtung des Perzepts und der mentale Rotationsrichtung resultieren. Eine *Bewegung* des Perzepts wäre hierfür aber nicht notwendig. Somit können m.E. die oben geschilderten Befunde nicht zweifelsfrei als Beleg für die *Analoge Bewegungshypothese* angenommen werden. Es erscheint vielmehr erforderlich,

die Konfundierung der Bewegung *mit einer gleichzeitigen* Veränderung der Orientierung aufzuheben.

Aus dieser Überlegung folgt die (I.) zentrale Forderung an ein neues Paradigma, mit dem die Wirkung einer Bewegung des Zielreizes auf die mentale Rotation untersucht werden kann: Mit einem neu zu entwickelnden Paradigma sollte es möglich sein, die Wirkung einer *kontinuierlichen* Bewegung des Zielreizes auf die mentale Rotation zu untersuchen, *ohne* daß der Zielreiz seine *vertikale* Orientierung ändert.

Bei der Untersuchung des Nacheffektparadigmas von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) fällt ein weiterer Umstand auf, der eine eindeutige Rückführung des Einflusses einer Bewegung auf die mentale Rotation erschwert. Heller und Ziefle (Heller & Ziefle, 1993; Hershenson, 1987; Hershenson, 1989) konnten zeigen, daß die Stärke des Bewegungsnacheffekts eine nicht-lineare Funktion der Zeit ist, die nach der Induktion verstreicht. D.h. wir können vermuten, daß der Eindruck des „paradoxen Kippens“ des Zielreizes mit der Winkeldisparität in irgendeiner Weise konfundiert ist. Der Zielreiz, der nach der Induktion des Nacheffekts präsentiert wird, bleibt solange sichtbar, bis die Versuchsperson reagiert (Corballis & McLaren, 1982). Wenn wir nun die Überlegung hinzunehmen, daß die Länge der Präsentation monoton linear mit der Winkeldisparität des Zielreizes verknüpft ist, wird die Forderung nach einer Kontrolle der Wirkung des Nacheffekts verständlich. Ein neues Paradigma sollte demnach die (II.) Forderung erfüllen, daß die Wirkung der Bewegung für jede realisierte Winkelstufe gleich ist.

Ein, in diesem Zusammenhang, weitere Nachteil des Bewegungsnacheffekts ist, daß seine Wirkung nicht auf den Zielreiz allein beschränkt ist. Die zuvor präsentierte texturierte Scheibe entfaltet ihre Wirkung natürlich auch auf den Hintergrund des Zielreizes. Wenn wir davon ausgehen, daß bei der Wahrnehmung eines Zielreizes in einem ersten Schritt der Vordergrund vom Hintergrund segregiert werden muß (Marr, 1982), und ein Teil des Hintergrundes zu „kippen“ scheint, und ein anderer Teil nicht (also die Teilfläche des Hintergrundes, die von der zuvor präsentierten Scheibe nicht abgedeckt wurde) so stellt sich damit wiederum eine unerwünschte Wirkung des Nacheffekts ein. Es ist zu ver-



muten, daß diese Eigenschaft des Nacheffekts keinen systematischen Einfluß auf die Rotationsgeschwindigkeit hat, gerade aber im Zusammenhang der nicht-linearen Wirkung des Effekts wird die (III.) Forderung an ein neues Paradigma plausibel, daß die Wirkung der Bewegung auf den Zielreiz beschränkt werden sollte.

Bleibt zu erwähnen, daß es als fraglich erscheint, ob die induzierte Wirkung des Nacheffekts für jede Versuchsperson gleich ist - genau das wird aber unterstellt und die Induzierungsdauer deswegen für alle Versuchspersonen gleich (bei Corballis (Corballis & McLaren, 1982) betrug sie 6 s) gehalten. Darüber hinaus wissen wir nicht, ob sich die Wirkung des Nacheffekts mit der Dauer des Experiments linear verhält. Vom versuchsplanerischen Standpunkt ist weiterhin zu bemerken, daß eine Induktionszeit von mehreren Sekunden *vor jedem* Trial das Verhältnis von Versuchsdauer zu Netto-Experimentaldauer unvorteilhaft erscheinen läßt. Heller und Ziefle (Heller & Ziefle, 1993) weisen darauf hin, daß auf der einen Seite, die Vielzahl verschiedener experimentellen Anordnungen zur Auslösung des Bewegungsnacheffekts (unabhängig von einer mentalen Rotation) zu teilweise inkonsistenten Ergebnissen geführt haben. Auf der Seite der abhängigen Variablen ebenfalls schwer ineinander überführbare Maße wie Dauer, Stärke und Geschwindigkeit des Bewegungsnacheffekts, dazu führen, daß experimentelle Befunde nur bedingt mit einander verglichen werden können (Heller & Ziefle, 1993).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß der Bewegungsnacheffekt sich nur unzureichend als geeignet erweist, eine Bewegung des Zielreizes mit einer mentalen Rotation zu kombinieren.

Die zentrale Idee für das neue Paradigma ist, die Bewegung des Zielreizes von einer Änderung seiner vertikalen Orientierung zu entkoppeln. Diese Forderung wird erfüllt, wenn der Zielreiz sich während der Präsentation zwar kreisförmig bewegt, dabei aber seine vertikale Orientierung beibehält: Der Zielreiz beschreibt eine Kreisbewegung um eine *externe Achse*, und nicht etwa um seinen Schwerpunkt. Hierdurch entsteht für den Betrachter der Eindruck einer Bewegung eines Zielreizes, der am Rand einer virtuellen (weil nicht sichtbare) Scheibe

angebracht ist, wobei die „Schwerkraft“ des Zielreizes seine vertikale Orientierung konstant hält, während die Scheibe eine Drehung vollzieht. Die Scheibe kann während eines Trials mit oder gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Um den Eindruck einer *kontinuierlichen* Bewegung zu erzeugen, ist eine schnelle Abfolge der Einzelbilder mit jeweils einer neuen Position des Zielreizes erforderlich. Die Präsentation des rotierenden Stimulus endet mit der Reaktion der Versuchsperson.

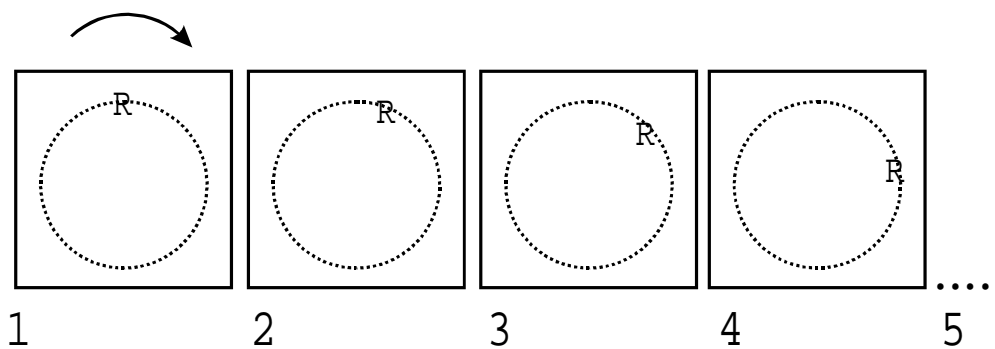


Abbildung 1: Dargestellt sind die einzelnen Frames, die in einer schnellen Abfolge der Versuchsperson präsentiert werden. Der Kreis (gepunktete Linie) ist nicht sichtbar und beschreibt die Trajektorie des Zielreizes. Hier wird deutlich, daß der Zielreiz („R“) seine lokale vertikale Ausrichtung nicht ändert. Die Präsentation der Kreisbewegung des Zielreizes (hier: mit dem Uhrzeigersinn) endet erst mit der Reaktion der Versuchsperson.

Diese kurze Beschreibung der neuen Versuchsanordnung, die im experimentellen Teil der Arbeit um die notwendigen Einzelheiten ergänzt werden wird, genügt m.E. um die oben aufgestellten Forderungen (insbesondere I. bis III.) zu erfüllen. Insbesondere ist damit sichergestellt, daß die zentrale Größe bei der es im Paradigma der mentalen Rotation geht, nämlich die Winkeldisparität des Zielreizes, unbeeinflußt von der Bewegung ist. Weiterhin ist die Wirkung der Bewegung auf den Stimulus beschränkt, und nicht etwa auf Teile des Hintergrunds. Der zu vermutende Einfluß der sichtbaren Kreisbewegung ist jedoch, zumindest auf den ersten Blick, nicht unabhängig von der vertikalen Orientierung des Stimulus. Auch hier läßt sich, wie bei Corballis (Corballis & McLaren, 1982) schon angemerkt worden war, einwenden, daß die Präsentationsdauer mit der Orientierung des Stimulus konfundiert ist: je weiter der Stimulus von seiner

Normalausrichtung ( $0^\circ$ ) entfernt ist, desto länger ist die Reaktionszeit und entsprechend länger ist auch die Präsentation der Kreisbewegung. Hiergegen bleibt nur einzuwenden, daß zwar die Präsentationsdauer vermutlich linear mit der Winkeldisparität steigt, ihr Wirkung auf den Betrachter bleibt stets die gleiche: Der Eindruck einer Kreisbewegung ändert sich vermutlich nicht mit der Länge seiner Wahrnehmung. Ganz anders verhält es sich jedoch beim Bewegungsnacheffekt: Mit zunehmenden zeitlichem Abstand von der Induktionsphase verändert sich die Wirkung - und zwar nicht-linear.

### 3. Empirische Prüfung der Fragestellung

Der nachfolgende Abschnitt soll der empirischen Prüfung der Fragestellung dienen, wie sich eine *physikalische* Rotation auf die *mentale* Rotation auswirkt. Dieser Abschnitt ist in drei Teile untergliedert, die unterschiedliche Ziele verfolgen. Im **ersten Teil** (Experimente 1a und 1b) wird ein neues Paradigma entwickelt, welches die Untersuchung der Interaktion der Winkeldisparität und der Bewegungsrichtung des Zielreizes erlauben soll. Der daran anschließenden **zweite Teil** (Experimente 2a und 2b) dient der Bestimmung von Randbedingungen, die als Ursache für die Interaktion der beiden wesentlichen experimentellen Faktoren (Winkeldisparität und Bewegungsrichtung des Zielreizes) in Frage kommen. Der **dritte Teil** (Experiment 3) schließlich, dient der Untersuchung der Fragestellung, auf welcher Verarbeitungsstufe die Interaktion der Bewegung des Zielreizes mit der mentalen Rotation wirksam wird.

Als Maß für die Wirkung der externen sichtbaren Kreisbewegung auf den internen Prozeß der mentalen Rotation wird im wesentlichen die Latenz herangezogen werden, die für eine Paritätsentscheidung benötigt wird, bzw. die Steigung der Reaktionszeitkurve, die als Maß der mentalen Rotationsgeschwindigkeit ( $\text{ms}/^\circ$ ) dienen soll. Das Grundprinzip aller berichteten Experimente ist, eine Paritätsentscheidung von den Versuchspersonen zu fordern, unter dem Einfluß einer sichtbaren Kreisbewegung.

- Im **Experiment 1a** stehen zwei Fragen im Vordergrund. Zum einen wird untersucht, ob das neu entwickelte Paradigma in der Lage ist, eine mentale Rotation auszulösen. Voraussetzung hierfür ist, daß die mittlere Reaktionszeit als Funktion der Winkeldisparität zunächst einen positiven Anstieg zeigt, die nach dem Erreichen der maximal möglichen Winkeldisparität abnimmt (siehe hierzu Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971)). Beide Flanken links und rechts vom Maximum sollten sich als äquivalent bezüglich der Rotationsgeschwindigkeit zeigen. Zum anderen soll der Einfluß der Kreisbewegung des Zielreizes während einer mentalen Rotation untersucht werden. Hierbei wird erwartet, daß - wie bereits von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) gezeigt -

die Bewegungsrichtung des Zielreizes einen Einfluß auf die Rotationsgeschwindigkeit hat, die ihrerseits von der Winkeldisparität abläuft.

- Im nachfolgendem **Experiment 1b** werden die Abstände zwischen den realisierten Winkelstufen auf  $20^\circ$  verkleinert werden, die im ersten Experiment noch  $45^\circ$  betragen. Im wesentlichen wird damit eine Replikation des ersten Experiments realisiert, die zudem eine Untersuchung der Fragestellung erlaubt, ob eine möglicherweise unentdeckte Maximumverschiebung im ersten Experiment aufgrund der großen Winkelabstände zustande kam. Sowohl Heil et al. (Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1995) als auch Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) berichten, daß es zu einer Verschiebung des Maximums der Reaktionszeitfunktion kam. Das Maximum, welches üblicherweise bei  $180^\circ$  beobachtet wird, lag bei nächst kleineren Winkeldisparität von  $180^\circ$ , wenn der induzierte Nacheffekt im Uhrzeigersinn wirkte. Wurde hingegen ein gegen den Uhrzeigersinn wirkender Nacheffekt induziert, so verschob sich das Maximum hin zu der nächst größeren Winkeldisparität von  $180^\circ$ . D.h. in beiden Fällen kam es dazu, daß die Versuchspersonen statt des üblicherweise bevorzugten kürzeren Wegs, auch über  $180^\circ$  rotierten. Demnach wurde die Wahrscheinlichkeit für die Entscheidung, die kürzere Winkelstrecke zu bevorzugen, von dem Nacheffekt in der Weise beeinflußt, daß mit einer größer werdenden Winkelstrecke häufiger die Rotationsrichtung mit dem Nacheffekt gewählt wurde. Eine Verkleinerung der Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Winkeldisparitäten sollte es ermöglichen, auch relativ schwache Verschiebungen zu entdecken, da nun die nächste Nachbardisparität  $20^\circ$  statt  $45^\circ$  entfernt ist.

- Im **Experiment 2a** wird der Frage nachgegangen, ob die zu Beginn der Darbietung eingeschlagene Richtung des kreisenden Zielreizes *alleine* schon für eine Interaktion verantwortlich sein könnte. D.h. es wird untersucht werden, ob die zuvor beobachtete und beschriebene Interaktion dadurch zustande kommt, weil das System die Richtung der Kreisbewegung des Zielreizes zu Beginn auswertet und hiernach, quasi als Folge dieser Auswertung eine Beschleunigung bzw. im inkongruenten Fall, eine Verzögerung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit erfährt. Zur Untersuchung dieser Hypothese wird statt der Kreisbewegung des Zielreizes eine Pendelbewegung desselben dargeboten werden. Die De-

definition der Kongruenz erfolgt hier über die erste sichtbare Bewegungsrichtung des Zielreizes. Mittels dieser Versuchsanordnung sollte es möglich sein, eine zentrale Eigenschaft der mentalen Rotation zu untersuchen: Eine erneut zu beobachtende Interaktion der beiden Bewegungsrichtungen, die nun nur auf der erstmaligen Auswertung der Initialrichtung beruhen kann, würde darauf schließen lassen, daß die Interferenz auf der Stufe der Entscheidung, in welcher Richtung (mit oder gegen den Uhrzeigersinn) die kürzere Winkelstrecke zu finden ist, erfolgt. Ein Ausbleiben der Interferenz würde auf der anderen Seite dafür sprechen, daß die mentale Rotation einen kontinuierlichen Prozeß darstellt, dessen Vulnerabilität gegenüber gleichzeitig einströmenden Informationen aus der Umwelt davon abhängt, ob diese Informationen ähnliche Eigenschaften beschreiben, wie der Prozeß sie selbst besitzt. Die Pendelbewegung des Zielreizes besitzt genau diese Eigenschaft nicht, und somit muß das System diese Art der Information zu ignorieren suchen, was u.U. auf Kosten verlangsamter Reaktionszeiten geht - die Geschwindigkeit der mentalen Rotation jedoch unbeeinflußt läßt.

- Das **Experiment 2b** soll die Frage klären helfen, ob eine Interaktion einer physikalischen Rotation mit der mentalen Rotation nur dann auftritt, wenn der Zielreiz selbst rotiert (ohne eine Veränderung seiner lokalen vertikalen Orientierung) oder ob die Interaktion auch dann zu beobachten ist, wenn zwar eine physikalische Rotation zu sichtbar ist, sie aber unabhängig vom Zielreiz ist. Wenn die Wahrnehmung einer Kreisbewegung (z.B. eines Punktes) während einer mentalen Rotation ebenso zu einer Wechselwirkung führt, wie bei der Wahrnehmung eines rotierenden Zielreizes, dann sollte der Schluß möglich sein, daß spezifische, für die Wahrnehmung einer Rotation zuständige Module gleichermaßen auch für die mentale Rotation zuständig sind. Sollte hingegen die Wahrnehmung einer solchen physikalischen Rotation keinen Einfluß auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit haben, so sollte der Schluß möglich sein, daß die mentale Rotation auf einer späteren Stufe der visuellen Wahrnehmung erfolgt.

- Mit dem **Experiment 3** soll die Frage, auf welcher Stufe der Verarbeitung der Interaktionseffekt auftritt, ausführlicher untersucht werden, als dies in den vorangegangenen Experimenten der Fall war. Hierzu realisierten wir ein Sternberg-Paradigma (Sternberg, 1969) mit dessen Hilfe einzelne Verarbeitungsstufen

manipuliert werden sollten. Wenn wir ein sequentielles, diskretes Stufenmodell der Verarbeitung annehmen, und einzelne Stufen der Verarbeitung experimentell beeinflussbar sind, so sollte es mit der Additiven Faktoren Methode möglich sein, den additiven Einfluß der Bewegung des Zielreizes auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit zu untersuchen. Durch Hinzufügung eines weiteren experimentellen Faktors, dessen Verarbeitung auf einer früheren (peripheren) Stufe vermutet werden kann als die mentale Rotation, sollte sein Einfluß zusammen mit der Bewegung des Zielreizes einen additiven Effekt auf die Reaktionszeit haben. Das Ausbleiben einer signifikanten Wechselwirkung dieser beiden Faktoren, die als Haupteffekte aber signifikant werden, wäre ein Hinweis darauf, daß die Effekte beider Variablen auf verschiedenen Verarbeitungsstufen ansetzen. Eine Unteradditivität der Faktoren „Winkeldisparität“ und „Kongruenz“ hingegen, wäre ein deutlicher Hinweis darauf, daß die Effekte beider Variablen auf die Reaktionszeit dadurch zustande kommen, daß sie auf der gleichen Verarbeitungsstufe angreifen. Dieses Befundmuster nach einer Fraktionierung der Reaktionszeiten, die auf bestimmten Annahmen beruht deren Plausibilität gesondert zu diskutieren ist, wäre ein weiterer Beleg für die Annahme des Bewegungscharakters der mentalen Rotation.

Nach der jeweiligen Darstellung der Experimente wird eine kurze Diskussion folgen, die sich auf Einzelaspekte der Ergebnisse beziehen wird. Schwerpunkt der, dem empirischen Teil sich anschließenden, Gesamtdiskussion wird es sein, die Befunde der Einzelexperimente im Zusammenhang darzustellen. Hierbei werden die Ergebnisse im Vergleich dargestellt werden und hinsichtlich der Arbeitshypothese beurteilt.

### **3.1 Erster Teil: Untersuchungen mit dem neuen Interferenzparadigma**

#### **3.1.1 Experiment 1a: Die Interferenz von physikalischer und mentaler Rotation als Indikator für den Bewegungscharakter eines Prozesses**

Die Beeinflussung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit erwies sich lange Zeit innerhalb der kognitiven Psychologie als problematisch. Corballis (Corballis, 1986) zeigte, daß die Steigung der Reaktionszeitkurve als Maß für mentale Rotationsgeschwindigkeit davon unabhängig ist, ob gleichzeitig Informationen im Gedächtnis aufrechterhalten werden müssen. In einem Dual-Task Paradigma wurden den Versuchspersonen zunächst verbale oder räumliche Informationen vorgegeben, die sie später abrufen sollten. Unmittelbar nach dieser Präsentation bearbeiteten die Versuchspersonen eine mentale Rotationsaufgabe und riefen hiernach die zuvor gesehenen Informationen ab. In einer Kontrollbedingung wurden die Latenzen ohne eine Zusatzaufgabe ermittelt. Es zeigte sich, daß die Höhe des Achsenabschnitts durch die Zusatzaufgabe beeinflussbar war. Räumliche Zusatzinformationen riefen die höchsten, verbale die zweit höchsten Basiszeiten hervor. Am schnellsten wurde in der Kontrollbedingung reagiert. Die Steigung hingegen unterschied sich in allen drei Bedingungen nicht. Corballis (Corballis, 1986) schloß hieraus, daß die mentale Rotation einen automatischen Prozeß darstellt, dessen Initialisierung variiert werden könne, seine Geschwindigkeit hingegen, nach erfolgter Initialisierung nicht.

Weiterhin konnten Bethell-Fox und Shepard (Bethell-Fox & Shepard, 1988b) zeigen, daß auch die Komplexität der verwendeten Zielreize keinen Einfluß auf die Steigung des Reaktionszeitverlaufs hatten - sofern die Bekanntheit der Reize kontrolliert gehalten werden konnte. Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) konnten darüber hinaus zeigen, daß die Rotationsgeschwindigkeit auch nicht davon abhängt ob die Rotation innerhalb der Bildebene (2D) oder in die Tiefe (3D) ausgeführt werden muß.

Im Hinblick auf die weiter oben diskutierte Arbeit von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982), die einen deutlichen Einfluß des Bewe-



gungsnacheffekts auf die Rotationsgeschwindigkeit zeigen konnten, lassen diese Untersuchungsergebnisse den Schluß zu, daß die mentale Rotation nur durch gleichzeitige Prozesse zu beeinflussen ist, die eine hohe Übereinstimmung mit der mentalen Rotation besitzen. Hieraus leitet sich der Grundgedanke für ein neues Paradigma ab, mittels dessen die angenommene Interferenz zweier Bewegungen untersucht werden kann. Die „Bewegung“ des Zielreizes in der Vorstellung zu seiner aufrechten Normalausrichtung ( $0^\circ$ ) beschreibt einen Kreis, bei dem der Zielreiz seine lokale vertikale Ausrichtung kontinuierlich ändert. Eine gleichzeitig sichtbare Kreisbewegung des Zielreizes, dessen vertikale Orientierung nicht verändert wird hat in dieser Hinsicht eine hohe Übereinstimmung mit der Bewegungs-Charakteristik der mentalen Rotation. Hieraus leiten sich die beiden Grundhypothesen für das Experiment 1a ab:

- (I) Es wird erwartet, daß sich die Reaktionszeit mit der zunehmenden Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner Normalausrichtung verlängert (Winkeleffekt).
- (II) Die Steigung der Reaktionszeitkurve sollte sich in Abhängigkeit von der Kongruenz der physikalischen und der mentalen Rotationsrichtung verändern: Bei einer Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen sollte sich eine höhere Rotationsgeschwindigkeit zeigen als in der inkongruenten Bedingung.

### **3.1.1.1 Methode**

#### **3.1.1.1.1 Versuchspersonen**

Für alle hier berichteten Experimente galt, daß jede Versuchsperson nur an einem der Experimente teilnehmen konnte. Alle Versuchspersonen nahmen freiwillig an den Experimenten teil. Vor jeder Experimentalsitzung wurden sie über ihre Aufgabe gründlich instruiert ohne daß sie über die Hypothesen informiert wurden. Im Anschluß an das Experiment konnten sie näheres über den theoretischen Hintergrund erfahren. Keine Experimentalsitzung mußte wegen technischer oder anderer Gründe abgebrochen werden.

An Experiment 1a nahmen 21 Versuchspersonen (Vpn) teil. Hiervon waren 10 Vpn weiblich. Die Altersspanne lag zwischen 19 und 32 Jahren. Das Durchschnittsalter betrug 28 Jahren. Alle Vpn waren nach eigenen Angaben Rechtshänder und normalsichtig. Für die Dauer des Expe-

riments wurden die Vpn mit Versuchspersonenstunden (1,5 h) bzw. mit 15,- DM entlohnt. Eine zuvor festgesetzte und den Vpn bekannte maximale Fehlerrate von 10% wurde von keiner der Vpn überschritten. Alle 21 Vpn gelangten somit in die Auswertung.

### 3.1.1.1.2 Material

Den Vpn wurden folgende vier Buchstaben zur Beurteilung ihrer Parität vorgegeben: F, L, R und P. Dabei handelte sich um die Großbuchstaben des Fonts „ARIAL“<sup>4</sup>, die nicht spiegelsymmetrisch sind. Die Buchstaben wurden weiß auf schwarzen Hintergrund dargeboten. Mit Hilfe eines Font Editors wurden alle 45° Vielfachen Orientierungen der Buchstaben erstellt. Für die gespiegelte Version des Buchstabens wurde zunächst eine Spiegelung an der Y-Achse vorgenommen und anschließend der Buchstabe gedreht. Die Höhe der Buchstaben betrug 2cm, die Breite 1,5cm. Bei einem Abstand der Vp vom Monitor von ca. 80cm entspricht das einer Höhe des Buchstabens von 1,43° und einer Breite von 1,07° Sehwinkel. Die Stimuli wurden auf einem Standard VGA Monitor (Bildschirmdiagonale: 15“) mit einer Auflösung von 800x600 Pixel dargeboten. Die Bildwiederholungsrate lag bei 64Hz.



Abbildung 2: Dargestellt (invertiert) sind die vier Zielbuchstaben in beispielhaften Orientierungen und Paritäten, die den Vpn einzeln präsentiert wurden: F[0°, normal], L[315°, normal], R[0°, gespiegelt] und P[270°, gespiegelt].

Die Kreisbahn, die der Zielreiz während seiner Darbietung beschrieb, hatte einen Radius von 5cm, was einem Sehwinkel von 3,43° entspricht. Die Vpn reagierten, indem sie eine von zwei Reaktionstasten („normal“ oder „gespiegelt“) drückten. Die Reaktionstasten waren auf einem Block der Größe 11 x 17 cm angebracht. Die Reaktionszeitmessung wurde nach der Darbietung des Buchstabens durch das Drücken einer der Tasten unterbrochen.

### 3.1.1.1.3 Prozedur

Der Experimentalfaktor „Winkel“ wurde 8stufig in Vielfachen von 45° realisiert: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 215°, 270° und 315°. Zu beiden Seiten von 180° gab es also gleich viele Winkelabstufungen (0° entspricht dann den 360°). Die Parität des Buchstabens wurde als Faktor „Version“ klassifiziert und hatte zwei Ausprägungen: gespiegelt, normal. Die vier Buchstaben repräsentierten den Faktor „Buchstabe“ mit vier Ausprägungen: F, L, R und P. Der Faktor „Kongruenz“

<sup>4</sup> Der File-Header des Arial-Fonts enthält folgende Spezifikationen: Name: Arial; Com plName: Arial; Family: Arial; Weight: Regular; Width Class: Medium; Style: Text, Without Serifs; Italic Angle: 0°; ID Number: 0; Underline Pos: -143; Underline Thick: 73; Hint Smoothing: 10.0; Ascender: 728; Descender: -210; Line Gap: 150; Type: Proportional; Protection: No Protection; Direction: Left to right. Es handelt sich um eine modifizierte Version eines der Standard Fonts von Microsoft® Windows®.

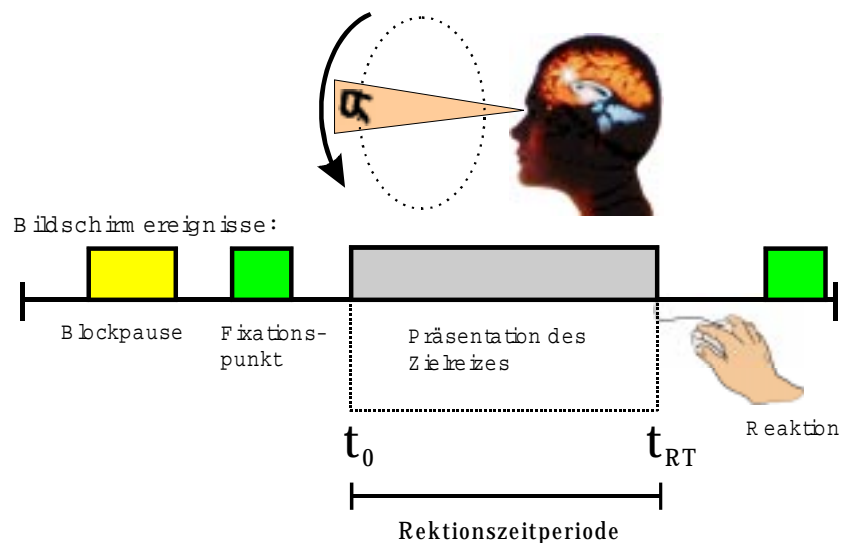
wurde aus der Kombination der Winkeldisparität und der Drehrichtung des Zielbuchstabens nach folgender Regel gebildet: War die Winkeldisparität kleiner oder gleich  $180^\circ$  und die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldisparität größer als  $180^\circ$  und die Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, so wurden diese Trials als „kongruent“ gekennzeichnet. War hingegen die Winkeldisparität kleiner als  $180^\circ$  und die Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldisparität größer als  $180^\circ$  und die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, so ergab das die zweite Stufe des Faktors „Kongruenz“ und diese Trials wurden als „inkongruent“ gekennzeichnet. Die Position von der aus der Buchstabe seine Kreisbewegung starten konnte wurde auf vier mögliche Punkte auf einem virtuellen Zifferblatt einer Uhr festgelegt: von 12.00 Uhr, 15.00 Uhr, 18.00 Uhr und 21.00 Uhr. Die Startpositionen waren über die Winkel, Buchstaben, Versionen und Drehrichtungen ausbalanciert.

Den Versuchspersonen wurden insgesamt 1024 Einzelaufgaben präsentiert die in die Auswertung gelangten. Dies ergibt sich aus der Kombination der Experimentalfaktoren und der Anzahl der Faktorstufen:  $4(\text{Buchstaben}) \times 8(\text{Winkel}) \times 2(\text{Versionen}) \times 2(\text{Kongruenz}) = 128$  Einzelaufgaben. Alle Einzelaufgaben wurden in 8 Wiederholungen dargeboten, woraus sich die Gesamtzahl aller Einzelaufgaben in einem Experiment zu 1024 ergibt. Die Gesamtdauer des Experiments betrug etwa 1,5 h.

Der zeitliche Ablauf einer Einzelaufgabe ist in der folgenden Abbildungen schematisch aufgezeigt:

Abbildung 3:

Nach jeder Blockpause, deren Ende die  $V_p$  bestimmte, wurden jeweils 16 Einzelaufgaben präsentiert. 1000 Millisekunden (ms) nach dem Löschen des Blockhinweises wurde ein Fixationspunkt dargeboten der für 500ms sichtbar blieb. Weitere 500ms später erschien der Zielreiz. Die Position, an der der Zielreiz erschien, war der  $V_p$  nicht bekannt. Nachdem sie



die Parität des Buchstabens bestimmt hatte reagierte die  $V_p$ . Der Zielreiz verschwand unmittelbar nach dieser Reaktion. Die nächste Einzelaufgabe wurde initialisiert und nach dem Löschen des letzten Zielreizes 1500ms später mit der Darbietung des Fixationspunktes gestartet.

Hauptziel des vorliegenden Experimentes war es, eine mögliche Interaktion zwischen der mentalen Rotation und der Drehbewegung des Zielreizes zu untersuchen. Die Drehbewegung wurde folgendermaßen realisiert. Die Koordinaten des Schwerpunktes des Buchstabens wurden mit jedem neuen Bildaufbau um  $5,6^\circ$  um dem Monitormittelpunkt rotiert. Bei einer eingestellten Bildwiederholrate des Monitors von 64 Hz ergibt eine vollständige Kreisbewegung des Zielreizes innerhalb einer Sekunde. Die Berechnung der transformierten Koordinaten ergab sich aus der folgenden Formel (1):

(1)

$$X = (X_1 - X_2) \times \cos \frac{\alpha}{\pi} - (Y_1 - Y_2) \times \sin \frac{\alpha}{\pi} + X_2$$

$$Y = (X_1 - X_2) \times \sin \frac{\alpha}{\pi} + (Y_1 - Y_2) \times \cos \frac{\alpha}{\pi} + Y_2$$

*Wobei  $X'$  und  $Y'$  die neuen Koordinaten des Objekts sind (hier die des Buchstabens),  $X_1$  und  $Y_1$  die Koordinaten des zu transformierenden Punktes sind (hier der XY Koordinaten des Schwerpunkts des Buchstabens),  $X_2$  und  $Y_2$  die Koordinaten um welchen Punkt rotiert werden soll (hier die XY Koordinaten des Monitormittelpunktes).  $\alpha$  steht für den Winkel um welchen rotiert werden soll ( $5,6^\circ$ ).*

Die Kreisgeschwindigkeit des Zielreizes ( $360^\circ/\text{s}$ ) ist dabei so gewählt, daß der Eindruck einer fließenden Bewegung entsteht. Da die Transformation der Zielreize um einen externen Punkt (Monitormittelpunkt) stattfand und nicht etwa um den Schwerpunkt des Buchstabens, veränderte sich seine vertikale Orientierung nicht. Es entstand für den Betrachter der visuelle Eindruck, der Buchstabe sei so am Rand einer sich drehenden Scheibe aufgehängt, daß die Schwerkraft seine vertikale Orientierung stabilisiert. War die Reaktionszeit länger als eine Sekunde, so wiederholte sich die Kreisbewegung (ohne eine sichtbare Pause) - so oft bis die Vp reagierte.

Die 1024 Einzelaufgaben wurden in 64 Blöcken á 16 Einzelaufgaben präsentiert. Die Versuchsperson war instruiert so schnell als möglich die Parität des Zielbuchstabens zu beurteilen, jedoch die Zahl der Fehler so gering wie möglich zu halten. Zu Beginn eines Blocks wurde der Vp die Anzahl der verbleibenden Blöcke und die relative Anzahl der bereits gemachten Fehler auf dem Monitor mitgeteilt. War die Vp bereit, so drückte sie einen beliebigen Reaktionstaster und der nächste Block wurde initialisiert. Vor der Darbietung des ersten Blocks wurde einmalig ein Trainingsblock mit 16 Aufgaben präsentiert, der nicht ausgewertet wurde. Er diente dazu, daß sich die Vp mit der Struktur der Darbietung vertraut machte, an die Art der Aufgaben gewöhnte und die richtige Benutzung der Apparatur kennenlernte. Am Anfang jeden Blocks wurden wiederum 5 Einzeldurchgänge dargeboten, die nicht in die Auswertung gelangten. Auch diese Trainingsdurchgänge zu Anfang jeden Blocks dienten dazu, daß sich die Vp nach der Blockpause auf die Aufgabe konzentrieren konnte und nicht Aufgaben aufgrund von Unaufmerksamkeit falsch beantwortete. Die Versuchsperson wußte um diese „warming up“-Trials nicht. Mit diesen Übungsdurchgängen und dem Trainingsblock wurden der Vp also 1360 Aufgaben präsentiert ( $64 * 5$  Übungsaufgaben + 16 Aufgaben im Übungsblock + 1024 auswertbare Aufgaben).

Als abhängige Variable wurden von dem Experimentalrechner die Reaktionszeit und die Antwort („normal“ oder „gespiegelt“) aufgezeichnet. Die Reaktionszeitmessung erfolgte von der Darbietung des Zielreizes (siehe Zeitpunkt  $t_0$  in der Abbildung 3) bis zum Drücken einer der beiden Reaktionstasten (siehe Zeitpunkt  $t_{RT}$  in der Abbildung 3).

#### 3.1.1.1.4 Auswertung

Die mittlere Reaktionszeit und mittlere Fehlerrate wurde für jede Bedingung und jede Versuchsperson separat errechnet. Für die Varianzanalyse (ANOVA) wurden alle Experimentalfaktoren (Winkeldisparität und Kongruenz) als „within-subject“ Effekte definiert. Alle varianzanalytischen Ergebnisse wurden nach der Methode von Huynh und Feldt (Huynh & Feldt, 1976) korrigiert. In einem ersten Auswertungsschritt wurde der Faktor „Version“ des Zielreizes (gespiegelt vs. normal) als Faktor in die Analyse mit einbezogen. Hierbei fand sich zunächst ein signifikanter Haupteffekt „Version“, der darauf hindeutete, daß die Reaktionszeit für gespiegelte Zielreize länger ist, als für normal dargestellte Reize ( $F(1, 20)=51,9$ ,  $p=0,0001$ ). Daneben fand sich noch eine Interaktion der beiden Faktoren „Version“ x „Winkeldisparität“ ( $F(7, 140)=8,12$ ,  $p=0,0001$ ). Diese Interaktion deutete daraufhin, daß die Linearität des Winkeleffekts für die gespiegelten Zielreizes größer war, als für die normal präsentierten Reize. Beide Effekte replizieren Ergebnisse, die in der Literatur oft berichtet wurden (siehe z.B. Koriat & Norman (Koriat & Norman, 1985)), die aber im Zusammenhang mit der berichteten Untersuchung keinen neuen Erkenntniswert darstellten. Wichtiger vielmehr war, daß der Faktor „Version“ nicht mit der im Vordergrund stehenden Kongruenz zwischen der mentalen Rotationsrichtung und der Drehrichtung des Zielreizes interagiert. Diese Tatsache wurde als Begründung dafür genommen, die „Version“ nicht weiter als Faktor zu berücksichtigen und die Daten darüber zu mitteln.

### 3.1.1.2 Ergebnisse

#### 3.1.1.2.1 Fehlerraten

Die Fehlerrate wurden signifikant nur von der Winkeldisparität des Zielreizes beeinflusst ( $F(7, 140) = 17,77$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,4$ ). D.h. bei einer Winkeldisparität von  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $225^\circ$  machten die Versuchspersonen im Mittel 4,8 % Fehler, im Gegensatz zu allen übrigen Winkeldisparitäten, bei denen sie im Mittel nur 1,4 % Fehler machten. Für weitergehende Analysen erscheint die Fehler-

rate als zu gering. Anzeichen für einen speed-accuracy trade-off der Fehlerraten, die in der Tabelle 1 dargestellt sind, konnten nicht ausgemacht werden.

Tabelle 1: Experiment 1a - Mittlere Fehlerrate (in %) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

Bedingung	Winkeldisparität							
	0°	45°	90°	135°	180°	215°	270°	315°
<i>Kongruent</i>	1,4	0,8	1,2	2,3	6,0	3,2	1,7	1,4
<i>Inkongruent</i>	1,1	0,9	1,8	5,3	6,6	5,0	2,0	0,8

### 3.1.1.2.2 Reaktionszeiten

Erwartungskonform zeigte sich ein starker Effekt der Winkeldisparität ( $F(7, 140) = 33,61, p < 0.0001, \epsilon = 0.17$ ). Weiterhin zeigte sich ein deutlicher Unterschied der kongruenten Bedingung im Vergleich zur inkongruenten Bedingung: Beim Vorliegen einer Inkongruenz der beiden Bewegungen reagierten die Versuchspersonen im Mittel erst nach 1065,58 ms im Unterschied zur kongruenten Bedingung, bei der im Mittel schon nach 975,43 ms reagiert wurde ( $F(1, 20) = 24.40; p < 0.0001$ ). In der Tabelle 2 sind die mittleren Reaktionszeiten dargestellt.

Tabelle 2: Experiment 1a - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

Bedingung	Winkeldisparität							
	0°	45°	90°	135°	180°	215°	270°	315°
<i>Kongruent</i>	802	836	919	1103	1314	1066	917	842
<i>Inkongruent</i>	810	888	1053	1250	1347	1255	1037	880

In der Abbildung 4 ist dieser Sachverhalt dargestellt.

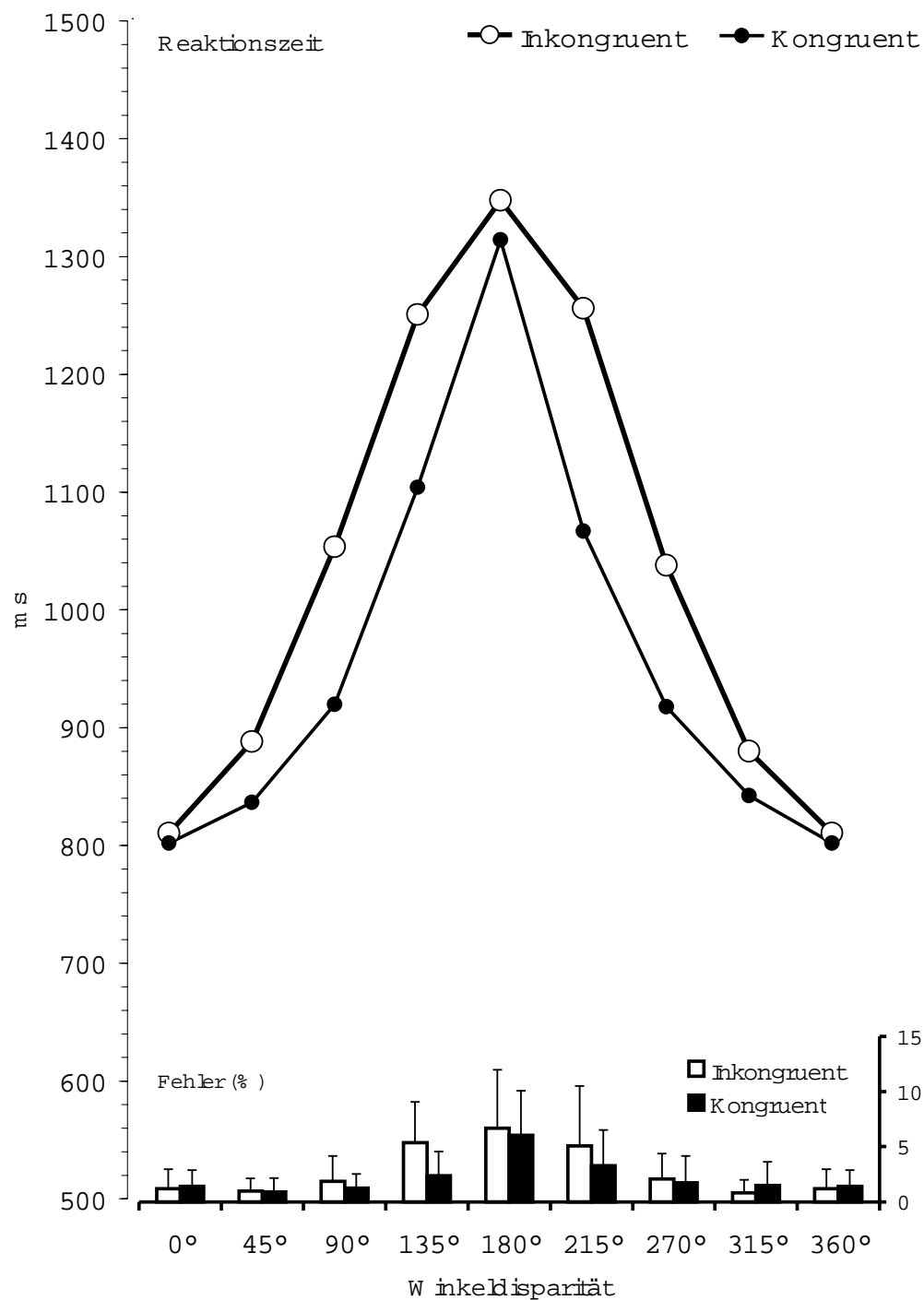


Abbildung 4: Experiment 1a - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität getrennt für die beiden Kongruenzbedingung über den Faktor „Version“ gemittelt en. Wie für die Varianzanalysen, sind auch hier nur richtige Antworten enthalten. Im unteren Teil der Abbildung sind die mittleren Fehlerraten (in %) mit jeweils einer Streuungseinheit dargestellt. Der Faktor „Kongruenz“ wurde hier nicht signifikant.

Als bedeutender hingegen zeigte sich eine signifikante Interaktion der Bewegungsrichtung des Zielreizes mit der vermuteten mentalen Rotationsrichtung ( $F = (7, 140) = 7,94; p < 0.0001, \epsilon = 0,50$ ). Um die unterschiedliche Wirkung der kongruenten und inkongruenten Trials über die verschiedenen Winkeldisparitäten hinweg, näher zu untersuchen wurden im nächsten Schritt die  $0^\circ$  - und die  $180^\circ$  - Bedingung aus der weiteren Analyse entfernt. Für die oben beschriebene Analyse wurde die Festlegung ob eine kongruente oder inkongruente Bedingung vorliegt, anhand der Übereinstimmung bzw. nicht Übereinstimmung der beiden Bewegungsrichtungen vorgenommen. Im Fall einer Winkeldisparität, die größer Null ist, erscheint dieses Vorgehen zunächst auch gerechtfertigt: der lineare Abfall der Latenzen links und rechts des Maximums der Reaktionszeitverteilung läßt ja vermuten, daß die jeweils abhängig vom vorgegebenem Winkel, der kürzeste Weg zur Normalausrichtung bevorzugt wird. Dies bedeutet, daß bei einer Winkeldisparität von  $45^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn rotiert wird, und bei einer Winkeldisparität von  $-45^\circ$  (was  $+315^\circ$  entspricht) mit dem Uhrzeigersinn rotiert wird. Diese Vermutung ist offensichtlich für die  $0^\circ$ -Bedingung nicht zutreffend, da hier weder mit- oder gegen den Uhrzeigersinn rotiert werden muß. Für die  $180^\circ$  - Bedingung hingegen ist davon auszugehen, die gewählte Rotationsrichtung mit oder gegen den Uhrzeigersinn gleichwahrscheinlich ist, da ja beide Winkelstrecken gleich lang sind. Somit erscheint auch die  $180^\circ$ -Bedingung nicht geeignet zu sein, um sie der kongruenten bzw. inkongruenten Bedingung zuzuordnen. Die hieraus resultierende Varianzanalyse mit nunmehr einem 6stufigen Winkelfaktor erbrachte vergleichbare Ergebnisse: Neben einem deutlichen Winkeleffekt ( $F(5, 100) = 28,39; p < 0,0001; \epsilon = 0,248$ ), zeigte sich erneut ein Effekt der Kongruenz ( $F(1, 20) = 23,91; p < 0,0001$ ), der unterschiedlich für die verschiedenen Winkeldisparitäten war ( $F(5, 100) = 7,55; p < 0,0001; \epsilon = 0,731$ ).

Wenn, wie oben vermutet, die Winkelstrecke für die Bedingung  $+45^\circ$  die gleiche ist wie für die Bedingung  $-45^\circ$  (bzw.  $+315^\circ$ ), dann sollte sich die Befundmuster bei einer Zusammenlegung äquivalenter Winkel ( $45^\circ$  und  $315^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $270^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $215^\circ$ ) wiederholen. Ein additiver Effekt der Orientierung und der Kongruenz würde vermuten lassen, daß der Effekt der Kongruenz konstant für die verschiedenen Winkeldisparitäten ist. D.h. die unterschiedliche Wirkung der



Kongruenz würde dann auf Kosten einer Initialisierung der mentalen Rotation zurückgehen, die unabhängig davon sind, wie lange die eigentliche mentale Rotationsphase andauert. Auf der anderen Seite jedoch, ließe sich auch vermuten, daß eine Wechselwirkung der beiden Faktoren auf einen Effekt der Kongruenz zurückgeht, der um so stärker ist, je länger die mentale Rotationsphase andauert. In der folgenden Analyse flossen deswegen zum einen die 0° und 180°-Bedingungen nicht mit ein, und zu anderen wurden die äquivalenten Winkel zu den neuen Winkelabstufungen von ± 45°, ± 90° und ± 135° zusammengelegt. Der Tabelle 3 sind die so errechneten Daten zu entnehmen.

*Tabelle 3: Experiment 1a - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.*

Bedingung	Winkeldisparität				
	0°	± 45°	± 90°	± 135°	180°
<i>Kongruent</i>		839	918	1085	
<i>Inkongruent</i>		884	1045	1252	

Dieser Sachverhalt ist der Abbildung 5 zu entnehmen.

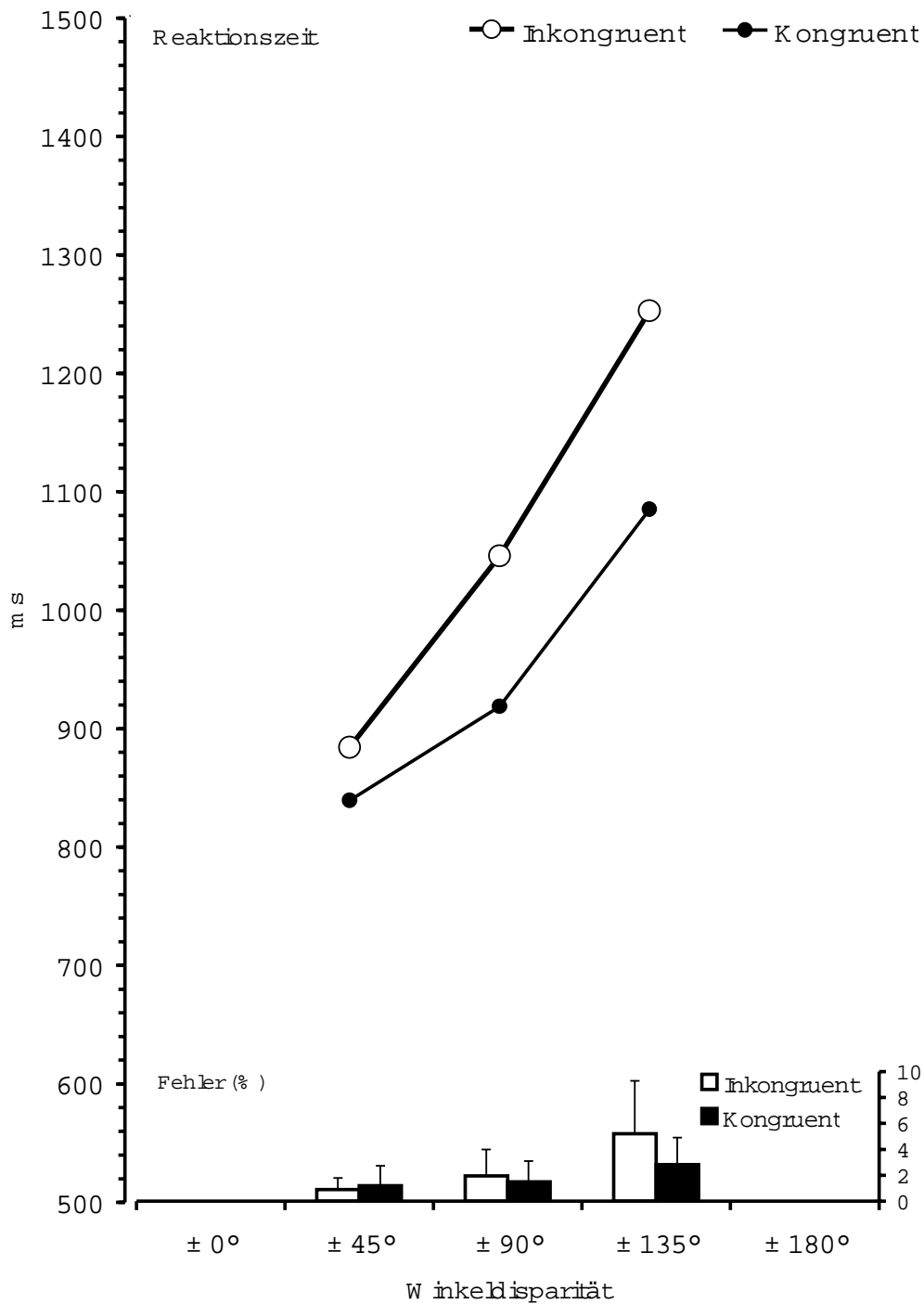


Abbildung 5: Experiment 1a - Darstellung der mittleren Reaktionszeit als Funktion der äquivalenten Winkelpaare getrennt für die beiden Ausprägungen des Faktors „Kongruenz“.

Auch hier zeigte sich neben einem deutlichen Winkeleffekt ( $F(2, 40) = 31, 32; p < 0,0001, \epsilon = 0, 535$ ) ein Kongruenzeffekt ( $F(1, 20) = 23, 87; p < 0,0001$ ). Die erwartete unterschiedliche Wirkungsweise der Kongruenz für die verschiedenen

Winkel drückte sich erneut in der Interaktion der beiden Bewegungsrichtungen aus ( $F(2, 40) = 11,71$ ;  $p < 0,0002$ ;  $\epsilon = 0,898$ ).

Ausgehend von diesen Daten wurde nun die Steigung der beiden Reaktionszeitkurven als Maß für die Rotationsgeschwindigkeit (in  $\text{ms}/^\circ$ ) für jede Versuchsperson und jede Bedingung getrennt ermittelt. Hier zeigte sich, daß die mittlere Rotationsgeschwindigkeit für die inkongruente Bedingung  $183,34 \text{ ms}/45^\circ$  (bzw.  $4,07 \text{ ms}/^\circ$ ) beträgt und für die kongruente Bedingung nur  $122,83 \text{ ms}/45^\circ$  (bzw.  $2,72 \text{ ms}/^\circ$ ) benötigt werden ( $F(1, 20) = 27,43$ ;  $p < 0,0001$ )<sup>5</sup>. D.h. die Differenz der beiden Kongruenzbedingungen über die 3 Winkelstufen ( $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$  und  $\pm 135^\circ$ ) betrug im Mittel  $60,51 \text{ ms} / 45^\circ$ .

### 3.1.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel des ersten Experiments war es, ein Paradigma zu erproben, welches die Untersuchung der mentalen Rotation unter der Bedingung einer kontinuierlichen Bewegung des Zielreizes erlaubt. Hierzu ergeben die Ergebnisse ein klares Bild.

Die Analyse der Fehlerraten ergab, daß die Zahl der korrekten Paritätsentscheidungen von der Winkeldisparität maßgeblich beeinflusst wurde. Mit der steigenden Winkeldisparität drückte sich der zunehmende Verarbeitungsaufwand auch in diesem Maß aus: je länger die Winkelstrecke, die ein vorgestelltes Objekt transformiert werden muß, um so mehr kommt es zu Fehlentscheidungen.

Ebenso zeigte sich ein starker Effekt der Winkeldisparität des Zielreizes auf die Reaktionszeit: Je weiter der Zielreiz von seiner Normalausrichtung abweicht, desto längere Latenzen werden beobachtet. Die Daten spiegeln weiterhin einen deutlichen Anstieg der Reaktionszeiten bis zur der maximalen Abweichung des Zielreizes ( $=180^\circ$ ). Neben diesem charakteristischen Verlauf, zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen den gespiegelten und normal dargestellten Rei-

---

<sup>5</sup> Bedingt durch die nicht-lineare Beziehung der Skalen  $\text{ms}/^\circ$  und  $^\circ/\text{ms}$  wurde nun geprüft ob bei einer Verwendung der  $^\circ/\text{ms}$ -Skala gleiche Resultate zu erzielen sind (Stelzl, 1982). Hierzu wurden die zuvor für jede Versuchsperson und jede Bedingung ermittelten Steigungen durch eine Transformation nach der Formel  $Y = 1/X$  in die Skala  $^\circ/\text{ms}$  überführt. Auch hier zeigte sich ebenfalls ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bedingungen ( $F(1, 20) = 10,93$ ;  $p < 0,0035$ ). Im weiteren Verlauf wird deshalb die Skala  $\text{ms}/^\circ$  verwendet werden.

zen. Damit ist ein weiterer „Standard“-Befund repliziert (siehe z.B. Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1988); Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982)), der darauf hin deutet, daß die normal Version eines Zielreizes von der Versuchsperson voraktiviert wird, noch bevor die Darbietung begonnen hat. Bei der gespiegelten Version des Zielreizes hingegen, muß eine solche Voraktivierung zurückgenommen werden, und das motorische Programm für die Reaktion „gespiegelt“ initialisiert werden. Diese Neuprogrammierung erfordert Zeit, die aber nicht davon abhängt, ob nun eine inkongruente oder kongruente Bewegungsrichtung des Zielreizes zu sehen war (siehe zu diesem Stufenmodell Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982); oder Experiment 3 der vorliegenden Arbeit).

Als weitaus interessanter erweist sich die Betrachtung des Faktors „Kongruenz“. Die Rotationsgeschwindigkeit nahm zu, wenn die Bewegungsrichtung des Zielreizes mit der mentalen Rotationsrichtung übereinstimmte. Sie nahm auf der anderen Seite ab, wenn diese beiden Bewegungsrichtungen inkongruent zueinander waren. Die Daten replizieren die Befunde von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und von Heil et al. (Heil et al., 1995). Dieser Kongruenzeffekt war davon unabhängig ob die beiden willkürlich definierten Winkeldisparitäten  $0^\circ$  und  $180^\circ$  in die Analyse einfließen. Bei einer Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken ( $45^\circ$  und  $315^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $270^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $225^\circ$ ) zeigte sich eine deutliche Zunahme des Kongruenzeffekts: Je größer die Winkelstrecke, über die ein Vorstellungsbild transformiert werden muß, um so stärker war der Einfluß auf die Rotationsgeschwindigkeit. Bei einer Winkeldisparität von  $135^\circ$  zeigte sich das Maximum dieses Einflusses. Die beiden Kongruenzbedingungen unterschieden sich nun um fast 100 ms. D.h. je länger die Bewegung des Zielreizes sichtbar war, desto stärker war ihr Einfluß auf die mentale Rotation.

### 3.1.1.4 Experiment 1b: Eine Replikation der ersten Untersuchung

Ziel des Experiment 1b ist es, zum einen die Ergebnisse des ersten Experiments zu replizieren und zum anderen die Ursache für den beschriebenen Interferenzeffekt näher zu untersuchen. Für eine aussagekräftige Replikation ist zu fordern, daß die Hypothesen, die für das Experiment 1a aufgestellt wurden, auch in einem Experimentalsetting Geltung haben, bei welchem die wesentlichen Experimental-Parameter gleich gehalten werden. Hierzu wurden die Parameter der Kreisbewegung des Zielreizes, also dessen Umlaufgeschwindigkeit und der Radius, des so beschriebenen Kreises aus dem Experiment 1a übernommen. Ebenso wurden auch die Reizeigenschaften, wie Größe, Helligkeit und die Art der Zielreize beibehalten. Bei einer Übernahme der Hypothesen, die für das erste Experiment aufgestellt wurden, ergeben sich also auch hier die folgenden Forderungen:

- (III) Es wird erwartet, daß sich die Reaktionszeit mit der zunehmenden Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner Normalausrichtung verlängert (Winkелеffekt).
- (IV) Die Steigung der Reaktionszeitkurve sollte sich in Abhängigkeit von der Kongruenz der physikalischen und der mentalen Rotationsrichtung verändern: Bei einer Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen sollte sich eine höhere Rotationsgeschwindigkeit zeigen als in der inkongruenten Bedingung (Kongruenzeffekt).

Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) berichten in ihrer Untersuchung zur Interaktion des Bewegungsnacheffekts mit der mentalen Rotation den Befund, daß sich das Maximum der Reaktionszeitfunktion bei 180° Winkeldisparität zeigt, wenn *kein* Bewegungsnacheffekt zuvor induziert worden war. Wurde hingegen ein Bewegungsnacheffekt erzeugt, so *verschob* sich das Maximum gegen die Richtung des Nacheffekts. Wenn also ein Nacheffekt in Richtung des Uhrzeigersinns induziert wurde, so lag das Maximum der Reaktionszeitfunktion bei 120° Winkeldisparität. Induzierte man hingegen einen Nacheffekt gegen

den Uhrzeigersinn, so lag das Maximum bei  $240^\circ$  Winkeldisparität. Diese Verschiebung des Maximums berichteten auch Heil et al. (Heil et al., 1995). Im Unterschied zu Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982), die  $60^\circ$  Vielfache für die Abstufung der Winkeldisparität verwandten, verkleinerten Heil et al. die Abstände der Winkeldisparitäten auf  $30^\circ$  Vielfache. Auch hier zeigte sich bei einem Nacheffekt *im* Uhrzeigersinn das Maximum bei  $150^\circ$  und bei einem Nacheffekt *gegen* den Uhrzeigersinn bei  $210^\circ$ . Die Bedeutung der Verschiebung des Maximums nach links oder rechts von der maximalen Winkeldisparität ( $180^\circ$ ) soll im folgendem Gedankengang verdeutlicht werden: Bei einer statischen Versuchsanordnung zur mentalen Rotation, bei der weder ein Nacheffekt zuvor induziert wurde, noch der Zielreiz irgendeine Bewegung ausführt, läßt sich annehmen, daß der um  $135^\circ$  gedreht dargebotene Zielreiz entlang der kürzeren Winkelstrecke in seine Aufrechte Orientierung mentale rotiert wird - also  $135^\circ$  gegen Uhrzeigersinn. Der Einfluß eines gleichzeitig wirksamen Bewegungsnacheffekts kann dann so beschrieben werden, daß die Versuchsperson dazu veranlaßt wird die bevorzugte, kürzere Winkelstrecke zu Gunsten der längeren, aber mit dem Nacheffekt kongruenten Rotationsrichtung aufzugeben. Die Stärke dieser „Bevorzugung der langen Winkelstrecke“ läßt sich wiederum als Funktion der Winkeldisparität des Zielreizes auffassen: Je größer die Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner Aufrechten Orientierung, desto eher wahrscheinlich erscheint die Entscheidung gegen die kurze Winkelstrecke. Bei einer Winkeldisparität von  $135^\circ$  ist somit die maximale Reaktionszeit erreicht, unter der Bedingung eines *mit* dem Uhrzeigersinn wirkenden Nacheffekts.

Hinweise für eine solche Verschiebung des Maximums konnten im ersten Experiment nicht ausgemacht werden. Dennoch wäre es denkbar, daß die Kreisbewegung des Zielreizes, die eine eindeutige Richtung hatte, von den Versuchspersonen zum Anlaß genommen wird, mit der Richtung des Reizes zu rotieren. D.h. ähnlich wie bei einem Nacheffekt, könnte die Kreisbewegung des Reizes, die Versuchspersonen dazu „verleiten“, die mentale Rotation eher in Richtung der Kreisbewegung auszuführen - obwohl über  $180^\circ$  rotiert werden muss. Es zeigte sich jedoch, daß sowohl in der kongruenten als auch in der inkongruenten Bedingung das Maximum bei  $180^\circ$  lag. Da jedoch relativ große Winkelabstände ( $45^\circ$ )

zwischen den Stufen der Winkeldisparität realisiert worden waren, ist es dankbar, daß eine solche Verschiebung unentdeckt geblieben ist. Es könnte daher sein, daß die Schwelle, ab der eine Entscheidung zu Gunsten der längeren Winkelstrecke getroffen wird, mit einer 135° großen Winkeldisparität noch nicht erreicht worden ist. Hieraus folgt die Überlegung, daß eine feinere Winkelabstufung eine Maximumverschiebung eher erfassen könnte. Die realisierten Abstufungen der Winkeldisparität betragen im Experiment 1b 20°. Neben der Möglichkeit eine Maximumverschiebung eher entdecken zu können, erlauben nun die feinere Abstufung eine verlässlichere Schätzung der Rotationsgeschwindigkeiten.

### **3.1.1.5 Methode**

Für das Experiment 1b wurden im wesentlichen die gleichen Methoden wie Experiment 1a angewendet. Es werden deshalb nur die Unterschiede zu Experiment 1a berichtet werden, bzw. zur Verdeutlichung nur wenige gemeinsame Merkmale der Experimente wiederholt dargestellt.

#### **3.1.1.5.1 Versuchspersonen**

Die Stichprobengröße in Experiment 1b betrug 33 Vpn. Hiervon waren 12 männlich. Der Altersdurchschnitt der Gruppe betrug 21 Jahre (mit einer Spanne von 19 bis 27 Jahren). Von den 33 Vpn waren 6 Linkshänder. Sie reagierten wie die übrigen Vpn mit ihrer dominanten Hand. Alle Vpn waren nach eigenen Angaben normalsichtig. Für die Teilnahme an diesem Experiment wurden sie mit 3,5 Experimentalstunden (oder 35,- DM) vergütet.

Die zuvor festgesetzte maximale Fehlerrate für das gesamte Experiment war, wie im ersten Experiment 10%. Keine der Vpn überschritt dieses Ausschlußkriterium - alle 33 Vpn gelangten in die Auswertung.

#### **3.1.1.5.2 Material**

Die Displaycharakteristik sowie die Eigenschaften der Zielreize und deren Kreisbewegung waren äquivalent (bis auf die Anzahl der Winkelabstufungen) zu Experiment 1b.

#### **3.1.1.5.3 Prozedur**

Im Unterschied zu Experiment 1a wurde im Experiment 1b der Experimentalfaktor „Winkel“ 18stufig in Vielfachen von 20° realisiert: von 0° bis 340° in 20° Schritten. Die weiteren unabhängigen Variablen waren: Buchstabe (F, L, R, P), Parität (normal, gespiegelt), Drehrichtung (mit oder gegen den Uhrzeigersinn). Die Startposition war wiederum über alle Faktoren ausbalanciert. Der Faktor „Kongruenz“ wurde aus der Kombination der Winkeldisparität und der Drehrichtung des Zielbuchstabens nach folgender Regel gebildet: War die Winkeldisparität kleiner oder gleich 180° und die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldispari-

tät größer als 180° und die Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, so wurden diese Trials als „kongruent“ gekennzeichnet. War hingegen die Winkeldisparität kleiner als 180° und die Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldisparität größer als 180° und die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, so ergab das die zweite Stufe des Faktors „Kongruenz“ und diese Trials wurden als „inkongruent“ gekennzeichnet.

Es wurden pro Experimentalsitzung insgesamt 2304 Einzelaufgaben dargeboten. Die Zahl der Einzelaufgaben verteilt sich dabei auf folgende Faktorenkombinationen:

4(Buchstaben) x 18(Winkel) x 2(Versionen) x 2(Kongruenz) = 288 Einzelaufgaben. Die Einzelaufgaben wurden wiederum in 8 Wiederholungen dargeboten, woraus sich dann die Gesamtzahl der Aufgaben von 2304 ergibt. Die reine Experimentaldauer betrug ca. 3,5 h pro Versuchsperson.

Die 2304 Einzelaufgaben wurden in 144 Blöcken mit jeweils 16 Aufgaben dargeboten. Auch hier wurde vor der Darbietung des ersten Blocks ein Trainingsblock mit 16 Aufgaben präsentiert, die nicht in die Auswertung gelangten. In jedem Block wurden auch 5 „warming up“-Trials dargeboten, die nicht in die Auswertung kamen. Brutto wurden der Vp also 3040 Aufgaben präsentiert (144 \* 5 Übungsaufgaben + 16 Aufgaben im Übungsblock + 2304 auswertbare Aufgaben).

Die Vp wurde instruiert so schnell wie möglich die Parität des Buchstabens zu beurteilen und dabei möglichst Fehlentscheidungen zu vermeiden. Die Kreisgeschwindigkeit des Zielreizes betrug wiederum 360°/s. Die weitere Prozedur sowie der zeitliche Ablauf der Bildschirmereignisse innerhalb einer Einzelaufgabe entsprach dem Experiment 1a.

Als abhängige Variabel wurden die Reaktionszeit (äquivalente Meßstrecke wie in Experiment 1a) und die Antwort („normal“ oder „gespiegelt“) pro Einzelaufgabe aufgezeichnet.

#### 3.1.1.5.4 Auswertung

Wie im ersten Experiment wurde die mittlere Reaktionszeit und die mittlere Fehlerrate für jede Bedingung und jede Versuchsperson einzeln berechnet. Die Faktoren Winkeldisparität (18fach gestuft) und Kongruenz (2fach gestuft) waren als within-subject Effekte definiert<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Auch in dieser Untersuchung erfolgte zunächst eine Auswertung mit dem zusätzlichen Faktor „Version des Zielreizes“ (gespiegelt vs. normal). Neben einem Haupteffekt „Version“ ( $F(1, 32) = 100,3; p < 0,0001$ ) zeigte sich die Interaktion der beiden Faktoren Version x Winkeldisparität signifikant ( $F(17, 544) = 15,59; p < 0,001; \epsilon = 0,42$ ). Damit wurde wiederum repliziert, daß die korrekte Antwort für einen gespiegelt dargestellten Reiz (835,8 ms) länger dauert als für einen normal dargestellten Reiz (722,4 ms). Daneben ein erneuter Hinweis auf die von Koriat & Norman (Koriat & Norman, 1985) berichtete, größere Linearität des Effekts für die gespiegelten Zielreize. Eine Interaktion mit dem hier besonders interessierenden Faktor „Kongruenz“ konnte nicht gefunden werden, was wiederum dazu führte, das für alle weiteren Analysen über die Antwortart gemittelt wurde.



### 3.1.1.6 Ergebnisse

#### 3.1.1.6.1 Fehlerraten

Die Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen beeinflusste die Fehlerrate signifikant ( $F(1, 32) = 33,46$ ;  $p < 0,001$ ). Es zeigte sich, daß im Falle einer Übereinstimmung der Bewegungsrichtungen 2,27% Fehler, und bei einer nicht Übereinstimmung 3,19 % Fehler gemacht wurden. Weiterhin beeinflusste die Winkeldisparität des Zielreizes die Fehlerrate ( $F(17, 544) = 29,73$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,49$ ). In der Gruppe der Winkeldisparitäten von  $\pm 0^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ , und  $\pm 80^\circ$  machten die Versuchspersonen im Mittel 1,24% Fehler, im Gegensatz zu den größeren Winkeldisparitäten von  $\pm 100^\circ$ ,  $\pm 120^\circ$ ,  $\pm 140^\circ$ ,  $\pm 160^\circ$  sowie  $\pm 180^\circ$ , bei denen im Mittel 4,4% Fehler produziert wurden.

Die Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 4: Experiment 1b - Mittlere Fehlerrate (in %) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

		<i>Winkeldisparität</i>							
Bedingung		0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
<i>Kongruent</i>		1,1	0,8	0,9	1,7	1,1	2,1	2,5	3,1
<i>Inkongruent</i>		0,7	1,4	1,3	1,6	1,6	3,8	4,3	5,1

		<i>Winkeldisparität</i>							
Bedingung		160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
<i>Kongruent</i>		4,8	5,8	4,4	3,1	2,3	1,4	1,4	1,3
<i>Inkongruent</i>		6,2	6,5	6,3	6,0	3,9	2,5	1,6	1,1

		<i>Winkeldisparität</i>	
Bedingung		320°	340°
<i>Kongruent</i>		1,1	1,4
<i>Inkongruent</i>		1,6	1,1

### 3.1.1.6.2 Reaktionszeiten

Wie schon in Experiment 1a zeigte sich erneut ein deutlicher Effekt der Winkeldisparität ( $F(17, 544) = 142,95$ ;  $p < 0,001$ ;  $\epsilon = 0,136$ ). Daneben wurde auch der Effekt Kongruenz signifikant ( $F(1, 32) = 141, 14$ ;  $p < 0,0001$ ). D.h. die mittlere Reaktionszeit für die kongruente Bedingung betrug in dieser Untersuchung 751,6 ms im Gegensatz zur inkongruenten Bedingung, bei der sie 807,4 ms betrug. In der Tabelle 2 sind diese mittleren Reaktionszeiten für die Bedingungen dargestellt.

Tabelle 5: Experiment 1b - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

		<i>Winkeldisparität</i>							
Bedingung	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	
<i>Kongruent</i>	639	640	653	668	688	736	776	837	
<i>Inkongruent</i>	645	666	670	701	726	803	865	931	

		<i>Winkeldisparität</i>							
Bedingung	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	
<i>Kongruent</i>	919	1044	922	849	773	735	692	667	
<i>Inkongruent</i>	1014	1023	1043	971	895	809	741	706	

		<i>Winkeldisparität</i>	
Bedingung	320°	340°	
<i>Kongruent</i>	659	638	
<i>Inkongruent</i>	690	663	

Wie in der Tabelle 6 zu sehen ist, liegt die mittlere Reaktionszeit in der inkongruenten Bedingung bei einer Winkeldisparität von 180° bei 1023 ms und bei einer Winkeldisparität von 200° bei 1043 ms. Diese leichte Maximumverschiebung wurde nun zum Anlaß genommen, getrennt für die beiden Kongruenz Bedingungen die Signifikanz der Rangfolge der Winkeldisparitäten zu ermitteln. Dabei zeigte sich, daß für die inkongruente Bedingung die Abfolge der *äquivalenten Winkelstufen* folgende ist: ( $\pm$ )  $0^\circ < 20^\circ = 40^\circ < 60^\circ < 80^\circ < 100^\circ < 120^\circ < 140^\circ <$

160° > 180°. Für die kongruente Bedingung hingegen findet sich eine lineare Abfolge mit zunehmender Winkeldisparität.

Darüber hinaus erwies sich auch die Interaktion der beiden Faktoren Winkeldisparität und Kongruenz als signifikant ( $F(17, 544) = 15,57$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,47$ ). In Abbildung 6 sind diese Beziehungen dargestellt.

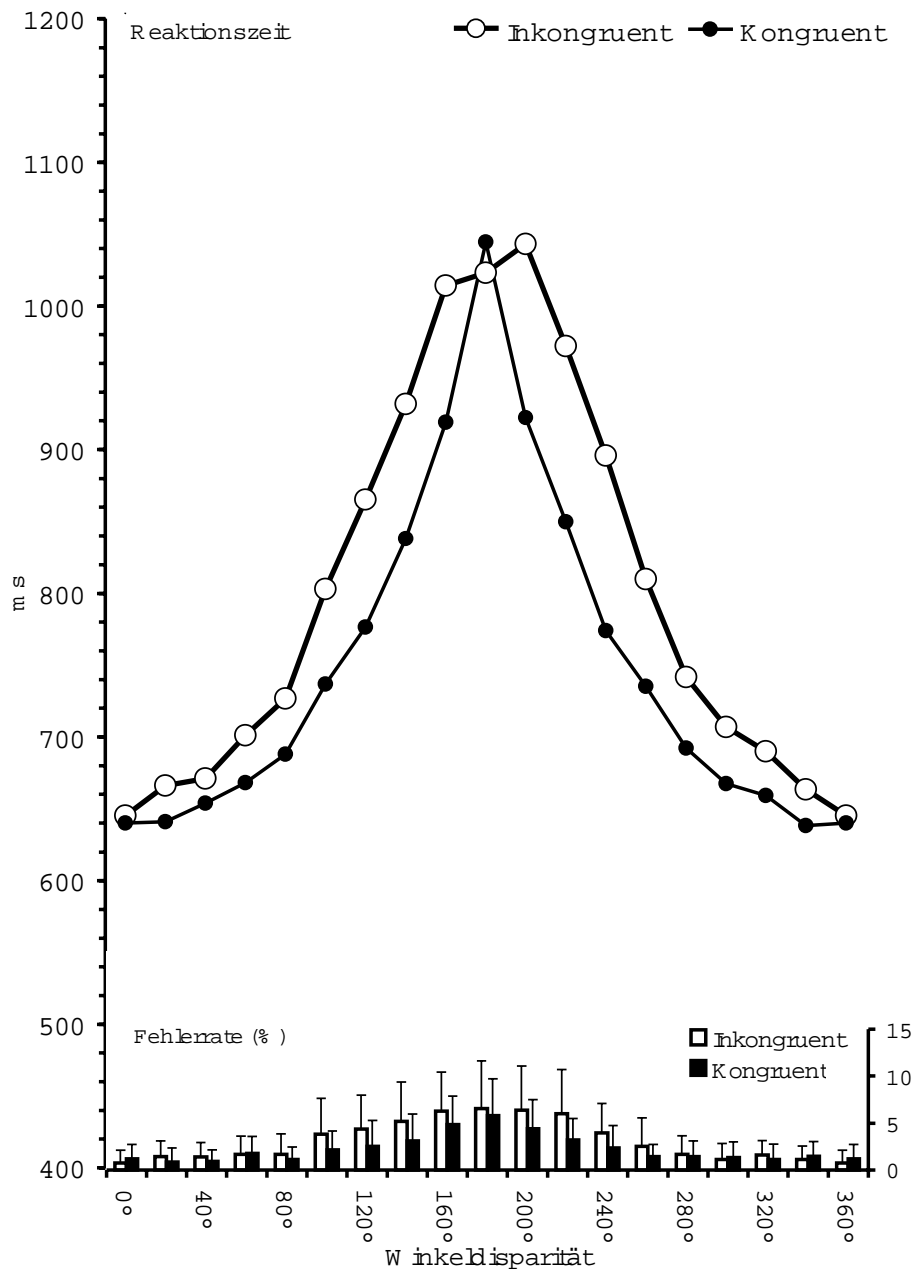


Abbildung 6: Experiment 1b - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der beiden Kongruenzbedingung. Wie für die Varianzanalysen, sind auch hier nur richtige Antworten enthalten. Im unteren Teil der Abbildung sind die mittleren Fehlerraten (in %) mit jeweils einer Streuungseinheit dargestellt.

Erneut wurden aufgrund der arbiträren Definition der Winkeldisparität von  $0^\circ$  und  $180^\circ$  als „kongruent“ oder „inkongruent“ diese beiden Datenpunkte aus der Auswertung entfernt. Es zeigte sich wiederum, daß die Interaktion der beiden Faktoren „Winkeldisparität“ und „Kongruenz“ bestehen bleibt ( $F(15, 480) = 14,19$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,58$ ), ebenso wie die beiden Faktoren „Winkeldisparität“ ( $F(15, 480) = 138,1$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,17$ ) und „Kongruenz“ ( $F(1, 32) = 148,67$ ;  $p < 0,0001$ ).

Auch in der vorliegenden Untersuchung wurden die äquivalenten Winkelstrecken zusammengelegt und es entstanden die neuen Winkeldisparitäten von  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 80^\circ$ ,  $\pm 100^\circ$ ,  $\pm 120^\circ$ ,  $\pm 140^\circ$  und  $\pm 160^\circ$ . Die varianzanalytische Auswertung der beiden Faktoren „Winkeldisparität“ (8fach gestuft) und „Kongruenz“ (2fach gestuft), erbrachte wiederum ein signifikantes Ansteigen der Reaktionszeit mit der zunehmenden Winkeldisparität ( $F(7, 224) = 192,2$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,21$ ). Auch hier zeigte sich ein deutlicher Kongruenzeffekt ( $F(1, 32) = 147,96$ ;  $p < 0,0001$ ).

*Tabelle 7: Experiment 1b - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“ ohne die  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , nach der Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken.*

Bedingung	Winkeldisparität								
	$0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	$60^\circ$	$80^\circ$	$100^\circ$	$120^\circ$	$140^\circ$	$160^\circ$
<i>Kongruent</i>		639	656	667	690	735	775	843	920
<i>Inkongruent</i>		664	680	703	734	806	880	951	1028

Die graphische Darstellung verdeutlicht noch einmal die Zunahme der Differenz der beiden Reaktionszeitverläufe mit zunehmender Winkeldisparität (siehe Abbildung).

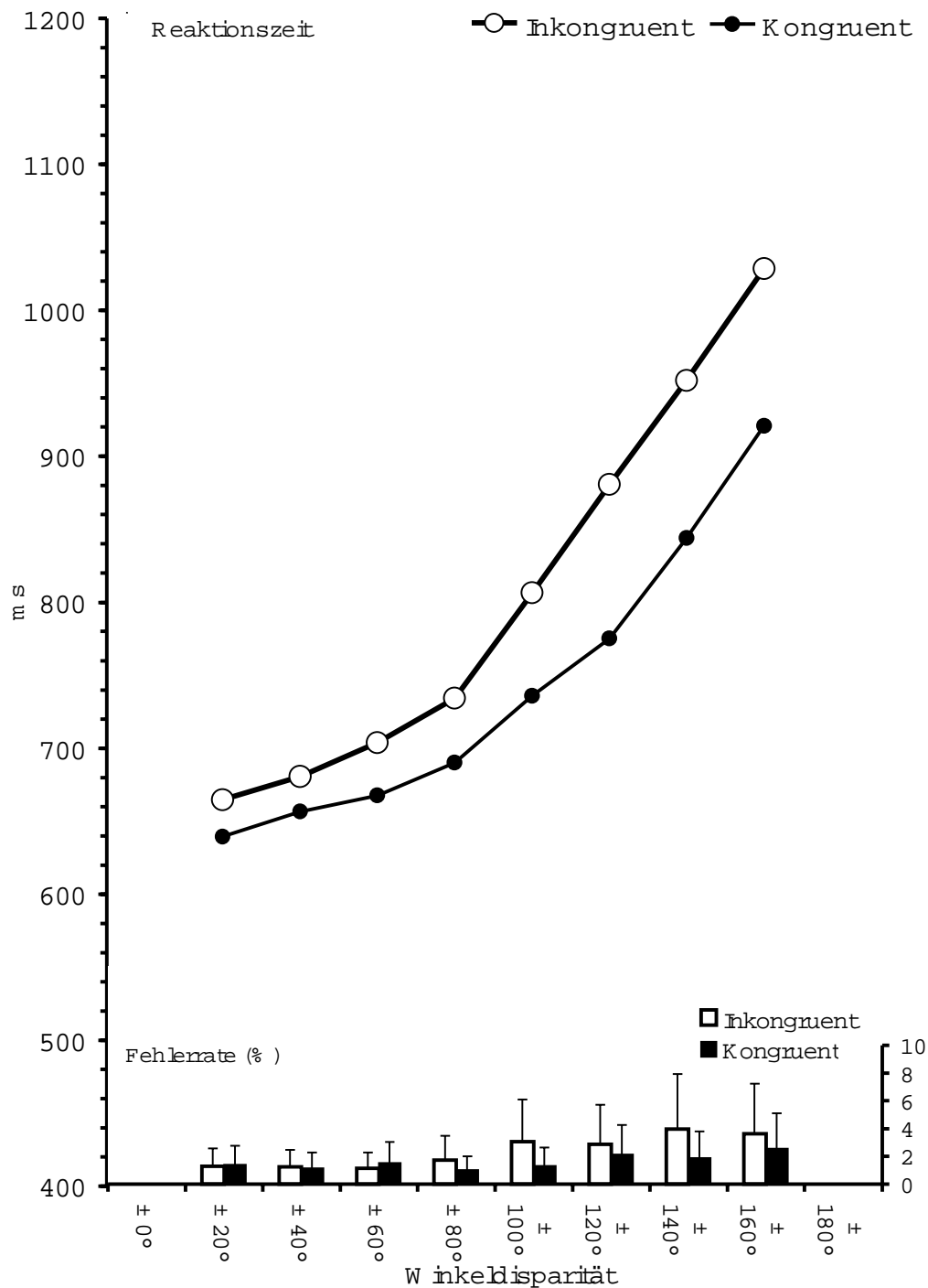


Abbildung 7: Experiment 1b - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten (über äquivalente Winkelstrecken gemittelt) als Funktion der Winkeldisparität und Kongruenz.

Die in der Abbildung 7 dargestellten Daten dienten zur Berechnung der Steigung der Kurven (separat für jede Versuchsperson). Hier zeigte sich, daß in

der inkongruenten Bedingung im Mittel 52,9 ms/20° (bzw. 2,6 ms/1°), und in der kongruenten Bedingung nur 38,3 ms/20° (bzw. 1,9 ms/1°) benötigt wurden. Auch dieser Unterschied erwies sich als bedeutend ( $F(1, 31) = 68,8; p < 0,0001$ ).

Bei dem in der Abbildung 7 dargestellten Verlauf der Reaktionszeiten fällt jedoch auf, dass neben einem linearen Trend auch ein quadratischer Anteil (oder ein Trend noch höherer Ordnung) im Trend zu vermuten ist. Diese Annahme wiederum kann zum Anlass genommen werden, die Ursache für die Nichtlinearität zu hinterfragen bzw. die Berechtigung für die Berechnung einer linearen Regression in Frage zu stellen. Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) fanden in ihrer Untersuchung, bei der sie dreidimensionale Stimuli verwendeten, nur eine lineare Komponente in ihren Daten. Cooper und Shepard (Cooper & Shepard, 1973) hingegen verwendeten alphanumerische Stimuli und fanden eine Reaktionszeitfunktion, die deutlich von einer linearen Funktion abwich. Der Anstieg der Reaktionszeitkurve mit zunehmender Winkeldisparität der Stimuli zeigte einen deutlichen quadratischen Trend auf. Copper und Shepard (Cooper & Shepard, 1973) diskutierten eine Erklärung für den unterschiedlichen Verlauf des Anstieges in den beiden erwähnten Studien, der auf der Überlegung beruht, dass mentale eine Rotation für bekannte Reize nur dann notwendig ist, wenn die Reize eine *starke* Abweichung zu ihrer normalen Ausrichtung aufweisen. D.h. bei nur geringen Abweichungen der Orientierungen von 0° wird eine geringe oder keine mentale Rotation für die Paritätsentscheidung gebraucht. Weicht der bekannte Reiz hingegen sehr stark von der normalen aufrechten Orientierung ab, so wird eine mentale Rotation notwendig. Dies, so Copper und Shepard (Cooper & Shepard, 1973), könne eine Erklärung dafür sein, dass in der Studie von Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) nur ein linearer Trend zu finden war, da hier die Verwendung dreidimensionaler Würfelfiguren, die für die Versuchspersonen gänzlich neu waren und mit denen sie keine Erfahrungen hatten, dazu führte, dass schon bei kleinen Abweichungen mental rotiert werden musste. Da die Versuchspersonen aber zweifellos mit alphanumerischen Stimuli mehr Erfahrung hatten, war eine mentale Rotation in der Studie von Copper und Shepard (Cooper & Shepard, 1973) erst bei größeren Abweichung notwendig. Diese Erklärung der Nichtlinearität wurde von Koriat und Norman (Koriat & Norman,

1985) explizit untersucht. Wenn die Annahme richtig ist, dass bekannte, überlernte Stimuli zu einem Nichtlinearen Verlauf der Reaktionszeitfunktion führen, so wäre ein linearer Verlauf bei neuen, unbekanntem Reizen zu erwarten. Bei alphanumerischen Stimuli müsste dieser Verlauf dann für die Distraktoren zutreffen. Die gespiegelte Version eines alphanumerischen Zeichens ist zweifellos keine überlernte Reiz, und von daher müsste ein Vergleich der gespiegelten Versionen mit den normal dargestellten Versionen der Reize einen unterschiedlichen Verlauf im Anstieg ergeben. Koriat und Norman (Koriat & Norman, 1985) fanden in ihrer Untersuchung diese Annahme bestätigt. Sie fanden, dass die Nichtlinearität auf die normal dargestellten Reize zurückzuführen ist, wohingegen bei den gespiegelten Reizen nur ein linearer Trend zu beobachten war. Für die normal dargestellten Reize konnte der lineare Trend 85% der Varianz in den Daten erklären und der quadratische zusätzliche 14% der Varianz. Für die gespiegelt dargestellten Reize hingegen konnte der lineare Trend 99% Varianz aufklären, der quadratische hingegen nur 0,7% der Varianz. D.h. das Überlernen eines Reizes (auch seiner verschiedenen, leicht von  $0^\circ$  abweichenden Orientierungen) führt zu einer „orientierungsfreien“ Repräsentation des Reizes, der dazu führt, dass bei einer Paritätsentscheidung mit einer kleinen Winkeldisparität ( $< 80^\circ$ ), nur wenig, oder gar nicht mental rotiert werden muss (siehe hierzu auch Cooper & Shepard, 1973; Kosslyn, 1980; Young, Paley, & Logan, 1980). Obwohl die gespiegelten Reize in ihrer Gestalt den normal dargestellten Reizen sehr ähnlich sind, müssen sie aber auch schon bei geringen Winkelabweichungen mental rotiert werden, da sie eben nicht überlernte Reize darstellten (Koriat & Norman, 1985).

Die Befunde von Koriat und Norman (Koriat & Norman, 1985) wurden zu Anlass genommen, die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit im Experiment 1b nur auf der Basis von Winkeldisparitäten auszuführen, bei denen ein deutlicher linearer Trend zu sehen ist ( $> 60^\circ$ ), und diejenigen Winkeldisparitäten unberücksichtigt zu lassen, bei denen daneben auch ein quadratischer Trend zu vermuten ist ( $< 80^\circ$ ). D.h. die neue Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit basierte nun nur auf den Winkeln  $\pm 80^\circ$ ,  $\pm 100^\circ$ ,  $\pm 120^\circ$ ,  $\pm 140^\circ$  und  $\pm 160^\circ$  (siehe Abbildung 7).

Wiederum wurden die Steigungen der Kurven (kongruent vs. inkongruent) separat für jede Versuchsperson berechnet. War die Bewegung des Zielreizes inkongruent zu der Rotationsrichtung der mentalen Rotation, so benötigten die Versuchspersonen im Mittel  $73,5 \text{ ms}/20^\circ$  (bzw.  $3,65 \text{ ms}/1^\circ$ ). Waren beide Rotationsrichtungen hingegen kongruent so wurde mit einer mittleren Rotationsgeschwindigkeit von  $57,8 \text{ ms}/20^\circ$  (bzw.  $2,8 \text{ ms}/1^\circ$ ) rotiert. Diese beiden Geschwindigkeiten unterscheiden sich ebenfalls signifikant ( $F(1, 31) = 90,3; p < 0,0001$ ). Die Reduzierung der Stützpunkte für die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit erbrachte also eine größere Steigung. Die Differenz der beiden Geschwindigkeiten hingegen blieb annähernd gleich: Wurden alle Winkelstufen miteinbezogen so betrug der Unterschied zwischen den beiden Kongruenz-Bedingungen  $0,7 \text{ ms}/1^\circ$ . Wurden die Winkelstufen bis  $80^\circ$  entfernt so betrug die Differenz der beiden Geschwindigkeiten  $0,85 \text{ ms}/1^\circ$ . Die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit mittels der linearen Regression führt also eher zu einer leichten Unterschätzung der beiden Geschwindigkeitsdifferenzen.

### **3.1.1.7 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Mit dem Experiment 1b sollten die Ergebnisse aus der ersten Untersuchung repliziert werden und der Frage nachgegangen werden, ob sich bei der Verwendung kleinerer Winkelabstufungen Verschiebungen der Maxima ergeben. Für die vorliegende Untersuchung wurde Abstufungen von  $20^\circ$  verwendet. Erneut zeigte sich ein starker Winkeleffekt. Die Reaktionszeiten scheinen, im Unterschied zu der ersten Untersuchung, insgesamt kürzer zu sein: Die schnellsten Reaktionszeiten finden sich bei  $0^\circ$  im Bereich von 640-650ms und erreichen ihr Maximum in der  $180^\circ$  Bedingung im Bereich von 1040ms. In der ersten Untersuchung wurden wesentlich längerer Latenzen beobachtet, die Mittel um 200ms länger sind als im Experiment 1b.

Bei der Untersuchung des Kongruenzeffekts findet sich erneut ein starker Einfluß der beiden Bewegungsrichtungen: Im Falle der Übereinstimmung beider Bewegungsrichtungen findet sich eine Beschleunigung der Reaktionszeiten. Hier benötigen die Versuchspersonen im Mittel für ein Grad Rotation  $1,9 \text{ ms}$ . Sind die



Bewegungen hingegen gegenläufig, so benötigen sie für die gleiche Winkelstrecke 2,6 ms. Bei einem Vergleich der Rotationsgeschwindigkeiten aus dem ersten Experiment findet sich, neben einer generell beschleunigten Reaktionszeit, daß auch der Effekt der Kongruenz kleiner geworden ist. Im ersten Experiment benötigten die Versuchspersonen in der inkongruenten Bedingung noch 4,0 ms für ein Grad Rotation und 2,7 ms in der kongruenten Bedingung.

Weiterhin zeigte sich bei der getrennten Betrachtung der Reaktionszeiten für die kongruente vs. inkongruente Bedingung, daß das Maximum der Reaktionszeit nicht bei 180° liegt. Das Maximum findet sich nun , nach der Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken bei 160°. Eine ähnliche Verschiebung konnte für die kongruente Bedingung nicht ausgemacht werden.

### **3.2 Zweiter Teil: Untersuchung der Randbedingungen für den Interferenzeffekt**

Mit Hilfe der folgenden Untersuchungen sollen zwei Randbedingungen untersucht werden, deren Beitrag für den beschriebenen Interferenzeffekt bisher noch nicht abgeschätzt werden konnte. Zum einen ist das die Frage, inwieweit die vom Zielreiz, zu Beginn der Darbietung, eingeschlagene Bewegungsrichtung für den Interferenzeffekt verantwortlich ist. Die kontinuierliche Kreisbewegung des Zielreizes wäre dann nicht notwendig für den Interferenzeffekt, da die Interferenz auf der Stufe der Initialisierung der mentalen Rotation passiert, wo der Zielreiz und seine Bewegungsrichtung erstmalig wahrgenommen wird.

Zum anderen wird der Frage nachgegangen werden, ob eine kreisförmige Bewegung in der Peripherie, mit einem zentralem statischen Zielreiz, ebenfalls eine Interferenz auszulösen vermag, oder ob diese Disassoziation zu einer interferenzfreien mentalen Rotation führt. Die Beantwortung dieser Frage würde einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Interferenzeffekts liefern: Die bloße Wahrnehmung einer *Bewegung* während der mentalen Rotation würde damit als Erklärung ausscheiden. Vielmehr wäre sie darin zu suchen, daß die Kopplung einer mentalen Rotation mit einem sich bewegendem Zielreiz erst zu einer Interferenz führt. Dies wiederum wäre ein starker Hinweis auf die Arbeitsweise der

mentalen Rotation: Der kontinuierliche Transformationsprozess produziert scheinbar Teilergebnisse, die permanent durch die gleichzeitige Wahrnehmung einer Kreisbewegung gestört werden. Als Folge davon wird die mentale Rotationsgeschwindigkeit im kongruenten Fall beschleunigt, und im inkongruenten Fall verzögert abgearbeitet.

### **3.2.1 Experiment 2a: Die Bedeutung der Initialrichtung**

Die bereits vorliegenden Befunde aus den vorangegangenen Experimenten deuten auf eine starke Interferenzneigung des Systems hin: Während der mentalen Rotation und einer gleichzeitig sichtbaren Kreisbewegung des Zielreizes beschleunigt, bzw. verzögert sich die Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Richtung dieser Kreisbewegung. Bei einer Übereinstimmung der physikalischen Bewegungsrichtung mit der mentalen Rotationsrichtung benötigen die Versuchspersonen für eine korrekte Antwort im Mittel  $2,72 \text{ ms}/1^\circ$  (siehe Experiment 1b). Sind die beiden Bewegungen hingegen gegenläufig so werden im Mittel  $4,07 \text{ ms}/1^\circ$  benötigt. Bei der Frage, welche Eigenschaft der Kreisbewegung für diesen deutlichen Geschwindigkeitsunterschied in den beiden Kongruenzbedingungen verantwortlich ist, bietet sich eine Erklärung an, die davon ausgeht, daß die *kontinuierliche* Kreisbewegung des Zielreizes zweitrangig für den Interferenzeffekt ist. Vielmehr könnte der Interferenzeffekt dadurch zustande kommen, daß bei der erstmaligen Enkodierung des Zielreizes, die ja zwangsläufig notwendig ist um eine korrekte Paritätsentscheidung zu produzieren, die Bewegungsrichtung des Zielreizes automatisch enkodiert wird, und dieses Information für den Interferenzeffekt verantwortlich ist. So gesehen, ist eine erneute Auswertung der Bewegungsrichtung des Zielreizes ja auch nicht notwendig, da die Bewegung *eindeutig* ist, und ihre Richtung beibehält. Die Richtigkeit dieser Annahme vorausgesetzt, bleibt als Quelle für den Interferenzeffekt nur das Information um die Bewegungsrichtung, welches zu Anfang der Darbietung des Zielreizes erworben wurde. Die Ergebnisse der bisherigen Experimente können zwischen der Möglichkeit einer kontinuierlichen Beeinflussung der Rotationsgeschwindigkeit und

einer Beeinflussung, die zu dem Zeitpunkt in der Initialisierungsphase der mentalen Rotation erzeugt wurde, nicht unterscheiden.

Wenn der Zielreiz nun eine Pendelbewegung ausführt, die jeweils nach einem Viertelkreis die Richtung ändert (mit/gegen Uhrzeigersinn), dann ist somit eine Situation geschaffen, in der innerhalb der erstmaligen Enkodierungszeit des Targets eine eindeutige Richtung der Kreisbewegung sichtbar ist. Wenn sich nun ein ähnlicher Interferenzeffekt wie in den bisherigen Experimenten zeigt, dann ist das ein Hinweis darauf, daß die mentale Rotation nicht solange beeinflussbar ist, wie sie selbst andauert. Ganz ähnlich wie in dem Dual-Task Paradigma von Corballis (Corballis, 1986), bei dem sich zeigte, daß der gleichzeitig aufrecht zu erhaltenden Gedächtnisinhalt, lediglich den Achsenabschnitt beeinflusste nicht aber die Rotationsgeschwindigkeit, wäre dieser Befund ein wichtiger Hinweis für die Arbeitsweise der mentalen Rotation. Für die Initialisierung einer mentalen Rotation wird Zeit verbraucht, die von den gleichzeitig vorliegenden Informationen stark moduliert wird. Im Fall einer Pendelbewegung des Zielreizes ist dies, neben der Tatsache daß eine Bewegung sichtbar ist, die erstmalig eingeschlagene *Bewegungsrichtung*. Diese Richtung kann einmal kongruent und einmal inkongruent zur mentalen Rotation sein. Die hiernach erfolgende mentale Rotation würde, wie es die Befunde von Corballis (Corballis, 1986) nahelegen, automatisch, d.h. unbeeinflußt von der vorliegenden Kongruenz ablaufen und der Effekt der Kongruenz würde sich nur auf den Achsenabschnitt auswirken. Anders formuliert: Der enkodierte Zielreiz wird von Teilprozessen räumlich transformiert, die keine direkte Verbindung zu den gleichzeitig vorliegenden Informationen, die durch die Retina bereitgestellt werden, haben.

Zeigt sich hingegen keine Interaktion der beiden Bewegungsrichtungen, so ist der Schluß möglich, daß die kurze Dauer der eindeutigen Bewegungsinformation nicht ausreicht um eine Interferenz auszulösen, und daß System die weiterhin sichtbaren, aber nicht mehr eindeutigen Bewegungsinformationen unterdrücken muß. Dies würde bedeuten, daß der Interferenzeffekt der bisherigen Experimente eine lineare Wirkungsweise hat: Je länger die Rotation andauert desto mehr Leistung des Systems muß aufgebracht werden, um gegen die Wirkung der

Inkongruenten Bewegungsinformation zu rotieren. Im kongruenten Fall hingegen, kann um so schneller rotiert werden.

Abweichend von den bisherigen Experimenten, bei denen stets eine gleichförmige Kreisbewegung des Targets sichtbar war, das seine Richtung nicht änderte, boten wir den Vpn nun ein Target dar, daß nach jeweils einem Viertelkreis (90°) seine Bewegungsrichtung änderte. Die Definition der Bedingung "kongruent/inkongruent" erfolgte nach der ersten gezeigten Bewegungsrichtung des Targets, also bevor der erste Viertelkreis abgeschlossen war.

Für das vorliegende Experiment wurden wiederum die beiden Hypothesen aus Experiment 1a und Experiment 1b übernommen - der Kongruenzeffekt bezieht sich nun mehr nur auf die Initialrichtung des präsentierten Zielreizes.

- (V) Es wird erwartet, daß sich die Reaktionszeit mit der zunehmenden Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner Normalausrichtung verlängert (Winkелеffekt).
- (VI) Die Steigung der Reaktionszeitkurve sollte sich in Abhängigkeit von der Kongruenz der Initialen- und der mentalen Rotationsrichtung verändern: Bei einer Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen sollte sich eine höhere Rotationsgeschwindigkeit zeigen als in der inkongruenten Bedingung (Kongruenzeffekt).

### **3.2.1.1 Methode**

#### **3.2.1.1.1 Versuchspersonen**

An Experiment 2a nahmen 21 Vpn teil. Die Vpn Gruppe enthielt 10 weibliche Vpn. Das Durchschnittsalter betrug 23 Jahre (Altersspanne: 20 bis 28 Jahre). Alle Vpn berichteten sie seien normalsichtig. In der Gruppe waren 16 Rechtshänder. Alle Versuchspersonen reagierten mit ihrer dominanten Hand. Die Versuchspersonen berichteten sie seien in der Lage die dargestellten Reize auf dem Monitor im eingestellten Abstand gut zu erkennen. Für die Teilnahme erhielten sie 3,5 Experimentalstunden gutgeschrieben oder wurden mit 35,-DM entlohnt.

Die maximale Fehlerrate von 10% wurde von keiner Vpn überschritten und so gelangten alle 21 Vpn in die Auswertung.

### 3.2.1.1.2 Material

Den Vpn wurden wie in den Experimenten 1a und 1b die vier Großbuchstaben (F, L, R und P) zur Beurteilung ihrer Parität vorgegeben. Alle weiteren Parameter (Farbe, Größe) der Zielreize sind äquivalent zu Experiment 1b.

Die wesentliche Variation zu Experiment 1b war das Bewegungsmuster des Zielreizes, während er von der Vp hinsichtlich seiner Parität beurteilt wurde. Der Zielreiz beschrieb nun keinen Vollkreis mehr - vielmehr einen Viertelkreis an dessen Ende er seine **Bewegungsrichtung änderte** und „zurückpendelte“. Für den Betrachter entstand der Eindruck eines Pendels, welches mit einer konstanten Kreisgeschwindigkeit um den Monitormittelpunkt pendelt. Weitere Parameter waren der Radius des Viertelkreises: er betrug wie in den beiden zuvor geschilderten Experimenten 5cm (3,43° Sehwinkel). Die Geschwindigkeit, mit der der Buchstabe hin und her pendelte betrug ebenfalls 90°/250ms (was gleichbedeutend ist mit 360°/s wenn der Buchstabe einen Vollkreis beschreibt). D.h. bei einer angenommenen mittleren Reaktionszeit von z.B. 900ms änderte der Buchstabe seine Bewegungsrichtung 3 mal.

Die Vpn reagierten indem sie eine von zwei Reaktionstasten („normal“ oder „gespiegelt“) drückten. Die Pendelbewegung wurde erst dann unterbrochen wenn die Vp reagierte.

### 3.2.1.1.3 Prozedur

Wie in Experiment 1b war auch hier der Experimentalfaktor „Winkel“ 18stufig in Vielfachen von 20° realisiert. Der Faktor „Buchstabe“ (F, L, R, und P) war vierfach gestuft. Die Parität des Buchstabens („normal“ vs. „gespiegelt“) war zweifach gestuft. Für die Bestimmung des Faktors „Drehrichtung“ wurde die Richtung der Bewegung beim ersten Pendelausschlag als Datum verwendet. D.h. nur die Initialrichtung der Pendelbewegung wurde für die Ausprägung dieses Experimentalfaktors genommen. Die Startposition, d.h. der Ort auf dem virtuellem Kreis, an dem der Buchstabe seine Bewegung bei jedem Einzeldurchgang aufnimmt, war wiederum über alle Experimentalfaktoren ausbalanciert. Der Faktor „Kongruenz“ wurde aus der Kombination der Winkeldisparität und der Drehrichtung des Zielbuchstabens nach folgender Regel gebildet: War die Winkeldisparität kleiner oder gleich 180° und die *erstmalige* Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldisparität größer als 180° und die *erstmalige* Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, so ergab wurden diese Trials als „kongruent“ gekennzeichnet. War hingegen die Winkeldisparität kleiner als 180° und die *erstmalige* Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn, bzw. war die Winkeldisparität größer als 180° und die *erstmalige* Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, so ergab das die zweite Stufe des Faktors „Kongruenz“ und diese Trials wurden als „inkongruent“ gekennzeichnet.

Es wurden pro Versuchsperson insgesamt 2304 Einzelaufgaben dargeboten. Die Zahl der Einzelaufgaben ergibt sich aus der vollständigen Kombination der Experimentalfaktoren:

$4(\text{Buchstaben}) \times 18(\text{Winkel}) \times 2(\text{Versionen}) \times 2(\text{Kongruenz}) = 288$  Einzelaufgaben. Die Einzelaufgaben wurden wiederum in 8 Wiederholungen dargeboten, woraus sich dann die Nettogesamtzahl der Aufgaben von 2304 ergibt - wie in den Experiment 1a und 1b wurden 5 „warming up“-Trials am Anfang eines Block, sowie ein gesamter Block am Anfang des Experiments als Trainingsblock präsentiert (Brutto erhielt die Vp demnach 3040 Trials dargeboten). Die reine Experimentaldauer betrug ca. 3,5 h pro Versuchsperson.

Die Vp erhielt nach jeweils 16 Aufgaben die Möglichkeit eine kurze Pause einzulegen. Die Instruktion erfolgte analog zu den beiden zuvor beschriebenen Experimenten: Die Vp sollte so schnell als möglich entscheiden ob der Buchstabe, unabhängig von seiner vertikalen Orientierung gespiegelt oder normal dargestellt ist. Sie wurde weiterhin darauf hingewiesen, daß die Sorgfalt bei der Entscheidung gleichrangig mit der Bitte um eine schnelle Reaktion zu sehen ist.

Die abhängige Variable war die Zeit, die von der Darbietung des Zielreizes bis zum Drücken einer der beiden Reaktionstasten verstrich. Die Reaktionsart („richtig“ vs. „falsch“) bildete pro Durchgang die zweite abhängige Variable.

#### 3.2.1.1.4 Auswertung

Es wurde zunächst die mittlere Reaktionszeit und die mittlere Fehlerrate für jede der Bedingungen und jede Versuchsperson einzeln berechnet. Wie für die übrigen Experimente galt auch hier, daß außer für die Analyse der Fehlerraten, nur die richtigen Reaktionen in die Auswertung mit einfließen. Die beiden experimental Faktoren „Winkeldisparität“ (18fach gestuft) und „Kongruenz“ (2fach gestuft) waren wiederum als within-subject Effekte definiert<sup>7</sup>.

### 3.2.1.2 Ergebnisse

#### 3.2.1.2.1 Fehlerraten

Die Fehlerrate wurden nur durch den Effekt der Winkeldisparität des Zielreizes bedeutend beeinflusst ( $F(17, 340) = 15,32; \epsilon = 0,3674$ ).

Die Fehlerraten für die einzelnen Bedingungen sind in der Tabelle 8 dargestellt.

---

<sup>7</sup> Erneut erfolgte die Auswertung mit dem zusätzlichen Faktor „Version“ des Zielreizes (normal vs. gespiegelt). Die dreifache Varianzanalyse erbrachte folgende Resultate: Der Haupteffekt „Version“ wurde abermals signifikant ( $F(1, 20) = 35,2; p < 0,0001$ ). Der Effekt beruht auch hier auf der bekannten Tatsache, daß gespiegelte Reize eine längere Latenzen (1200,0 ms) produzieren als normal dargestellte Reize (986,13 ms). Daneben zeigte sich auch die Interaktion mit der Winkeldisparität signifikant ( $F(20, 17) = 7,95; p < 0,0001$ ) (siehe Koriat & Norman (Koriat & Norman, 1985)). Eine signifikante Interaktion mit dem Faktor „Kongruenz“ fand sich nicht – dies wurde wiederum als Begründung genommen, die Daten über den Faktor „Version“ zu mitteilen.

Tabelle 9: Experiment 2a - Mittlere Fehlerrate (in %) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

Winkeldisparität								
Bedingung	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
Kongruent	0,5	1,1	0,7	0,5	0,5	0,8	1,3	2,3
Inkongruent	0,5	0,4	0,6	0,5	0,7	0,9	1,3	3,1

Winkeldisparität								
Bedingung	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
Kongruent	2,5	3,7	2,8	2,3	1,7	0,9	0,8	0,2
Inkongruent	2,976	4,018	2,827	3,348	1,935	1,339	0,446	0,818

Winkeldisparität		
Bedingung	320°	340°
Kongruent	0,595	0,521
Inkongruent	0,893	0,67

### 3.2.1.2.2 Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten wurden signifikant durch die Winkeldisparität des Zielreizes beeinflusst ( $F(17, 340) = 61,99$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,144$ ). Daneben fand sich ein im leichter Einfluß der Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen auf die Reaktionszeit ( $F(1, 20) = 4,86$ ;  $p < 0,03$ ). Die mittlere Reaktionszeit in der kongruenten Bedingung betrug 1081,69 ms im Gegensatz zur mittleren Reaktionszeit in der inkongruenten Bedingung 1100,8 ms.

In der Tabelle 10 sind diese mittleren Reaktionszeiten für die Bedingungen dargestellt.

Tabelle 11: Experiment 2a - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

Winkeldisparität								
Bedingung	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
Kongruent	849	886	893	933	992	1071	1160	1267
Inkongruent	872	876	933	943	988	1085	1165	1269

Winkeldisparität								
Bedingung	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
Kongruent	1379	1512	1387	1283	1157	1060	982	921
Inkongruent	1376	1523	1428	1304	1211	1119	1013	950

Bedingung	<i>Winkeldisparität</i>	
	320°	340°
<i>Kongruent</i>	906	863
<i>Inkongruent</i>	891	903

Eine Interaktion der beiden Faktoren „Winkeldisparität“ mit „Kongruenz“ fand sich nicht. In Abbildung 8 sind diese Beziehungen graphisch dargestellt.



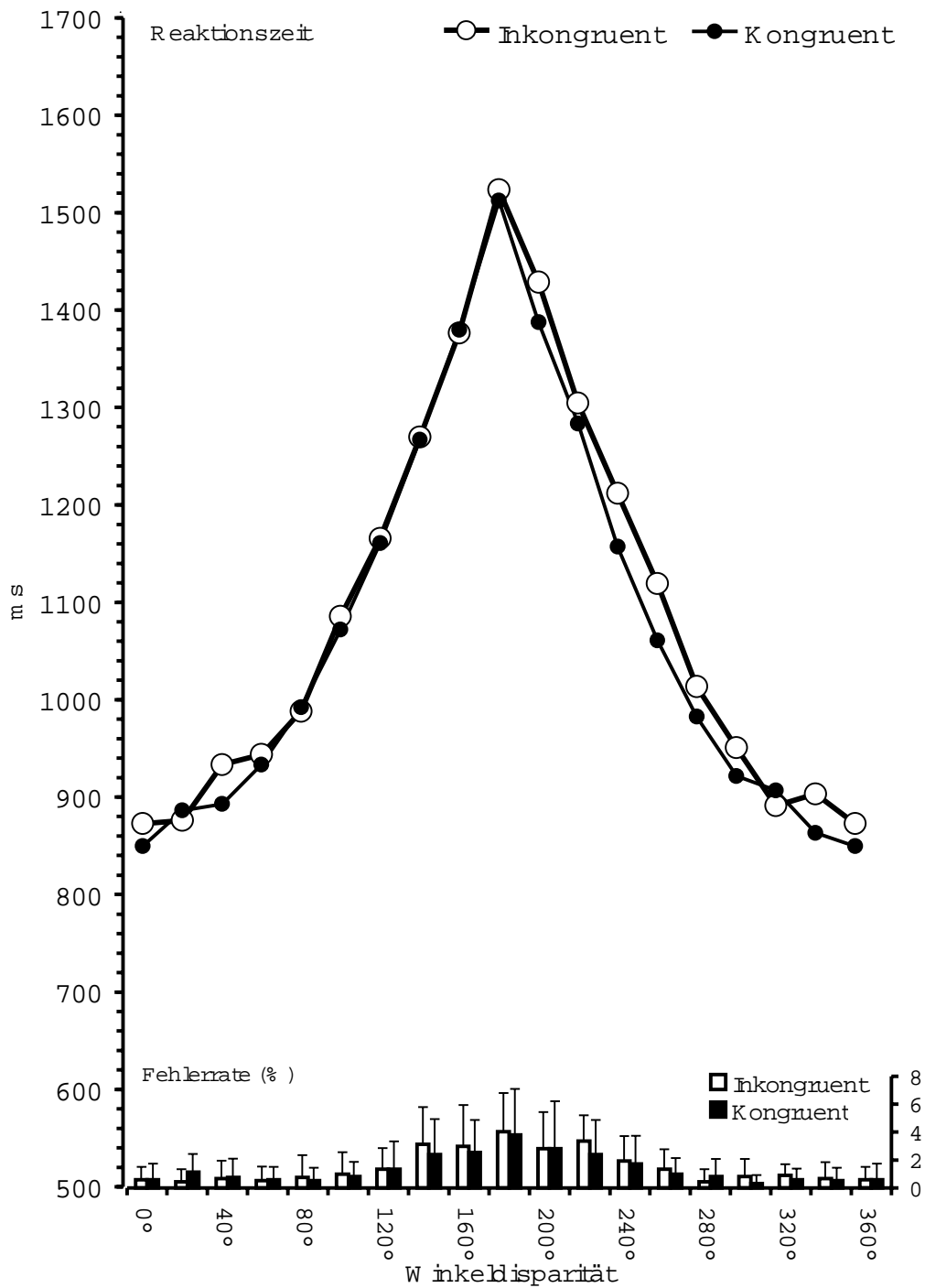


Abbildung 8: Experiment 2a - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der beiden Kongruenzbedingungen. Die Interaktion dieser beiden Faktoren ist nicht signifikant.

Um den Beitrag der beiden arbiträr definierten Bedingungen 0° und 180° zu eliminieren, wurde eine Varianzanalyse ohne diese beiden Winkelstufen gerechnet. Der nunmehr 16fach gestufte Faktor Winkeldisparität erwies sich nach

wie vor als signifikant ( $F(15, 300) = 57,4$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,173$ ). Auch die Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen blieb signifikant ( $F(1, 20) = 5,21$ ;  $p < 0,03$ ). Die Interaktion dieser beiden Faktoren blieb weiterhin nicht signifikant.

Die Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken ( $\pm 20^\circ$  bis  $\pm 160^\circ$ ) ohne die  $0^\circ$  und  $180^\circ$  erbrachte folgendes Resultat: Winkeldisparität ( $F(7, 140) = 77,43$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,216$ ); Kongruenz ( $F(1, 20) = 5,21$ ;  $p < 0,03$ ). Die nachfolgende Tabelle

*Tabelle 12: Experiment 2a - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“ ohne die  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , nach der Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken.*

Bedingung	Winkeldisparität								
	$0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	$60^\circ$	$80^\circ$	$100^\circ$	$120^\circ$	$140^\circ$	$160^\circ$
<i>Kongruent</i>		874	900	927	987	1066	1158	1275	1383
<i>Inkongruent</i>		889	912	947	1000	1102	1188	1286	1402

Die graphische Darstellung verdeutlicht, im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen, daß es hier nicht zu einer Zunahme der Differenz der beiden Kongruenzbedingungen mit zunehmenden Winkel kommt (siehe Abbildung).

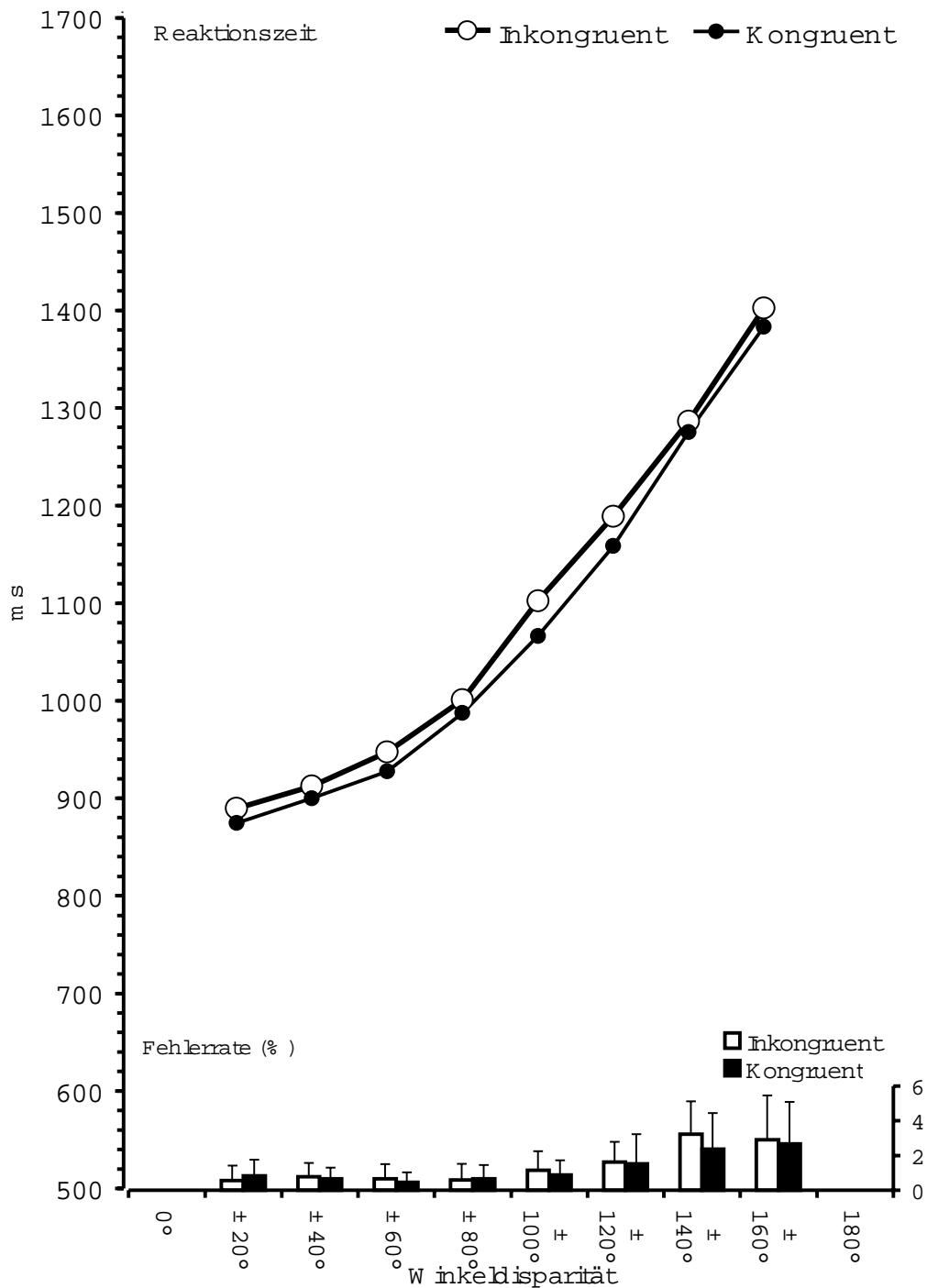


Abbildung 9: Experiment 2a - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten (über äquivalente Winkelstrecken gemittelt) als Funktion der Winkeldisparität und Kongruenz.

Die anschließende Analyse der Steigungen der beiden Kongruenzbedingungen zeigte keinen signifikanten Unterschied ( $F(1, 20) = 0,09; p < 0,769$ ).

### 3.2.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel dieser Untersuchung war es, einen Aspekt der Kreisbewegung des Zielreizes, auf seine Bedeutung für den in Experiment 1a und 1b gefundenen Interferenzeffekt hin, zu untersuchen: die Initialrichtung. Damit ist die Bewegungsrichtung gemeint, die der Zielreiz zu Beginn seiner Darbietung ausführt. In dieser veränderten Version der Versuchsanordnung führt der Zielreiz keinen Vollkreis aus, sondern ändert seine Bewegungsrichtung nach einem Viertelkreis. Für die Versuchsperson bietet sich damit eine Situation dar, in der der Zielreiz zu Beginn der Darbietung eine kongruente oder inkongruente Bewegungsrichtung in Bezug auf die geforderte mentale Rotation zeigt. Kurze Zeit später jedoch (d.h. nach 250ms) kehrt sich die Richtung um. Welchen Einfluß hat nun diese Pendelbewegung des Zielreizes auf die Reaktionszeit?

Zunächst, und dies war aus den vorherigen Experiment zu erwarten, fand sich ein Effekt der Winkeldisparität. Daneben fand sich auch ein, wenn auch kleinerer Effekt der Kongruenz auf die Reaktionszeiten. D.h. wenn die erste Bewegung des Zielreizes kongruent zu der Rotationsrichtung war, reagieren die Versuchspersonen schneller, als im inkongruenten Fall. Dies ist ein Hinweis darauf, daß es in einer frühen Phase der mentalen Rotation (also in ersten 250 ms) zu einem Einfluß der Bewegungsrichtung des Zielreizes auf die mentale Rotation kommt. Bedeutsam jedoch wird in diesem Zusammenhang, daß es dabei scheinbar nicht zu einer Änderung der Rotationsgeschwindigkeit kommt. Das Ausbleiben einer signifikanten Interaktion der mentalen Rotationsrichtung mit der *Initial*-Bewegungsrichtung des Zielreizes ist ein deutlicher Hinweis hierauf. Die Abbildung 10 zeigt diesen Sachverhalt deutlich: Die beiden Kurvenverläufe zeigen einen Unterschied, der über alle Winkeldisparitäten seine Größe beibehält. Wir finden dort aber keinen Unterschied in der Steigung der Reaktionszeit-Winkelfunktion. Hier kommt es offensichtlich beim Onset der mentalen Rotation zu einem Unterschied, der sich aber nicht, wie in den Experimenten 1a und 1b mit der Länge der geforderten Transformation verändert. Die Initialrichtung trägt somit zu einer Anheben bzw. Absenkung der Reaktionszeiten über alle Winkeldisparitäten bei, sie ist aber nicht ausreichend für eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit.

### 3.2.2 Experiment 2b: Die Bedeutung einer peripheren Bewegung

Die Grundidee für die folgende Untersuchung ist, die Kreisbewegung des Zielreizes durch eine Kreisbewegung eines Punktes zu ersetzen, und den Zielreiz statisch im Mittelpunkt des Bildschirms zu präsentieren. Der Radius des Kreises ist gleich dem, der in den vorherigen Experimenten von dem Zielreiz beschrieben wurde. Diese Untersuchungsanordnung stellt somit sicher, daß der Punkt innerhalb des Gesichtsfeldes ist, und in jedem Fall von der Versuchsperson wahrgenommen wird, wenn sie den zentralen Zielreiz zu enkodieren sucht. Der Punkt kann wiederum wie in den Experimenten zuvor der Zielreiz, mit oder gegen den Uhrzeigersinn um den zentralen Zielreiz rotieren. Neben einer gleichförmigen Bewegung, in der sich die Bewegungsrichtung nicht ändert, ist in 50% aller Einzelaufgaben eine Pendelbewegung des Punktes realisiert. In Gewisserweise ist mit diesem Experiment eine Kombination der Experimente 1b und 2a entstanden, mit dem Unterschied, daß die gleichförmige bzw. Pendelbewegung, die mit oder gegen den Uhrzeigersinn ausgeführt werden kann, nun von einem peripherem Punkt, statt vom Zielreiz selbst, ausgeführt wird.

Bei der beschriebenen Untersuchungsanordnung steht die Frage im Vordergrund, ob der beschriebene Interferenzeffekt darauf zurückzuführen ist, daß *eine Bewegung* während der mentalen Rotation sichtbar ist, oder daß es notwendig ist, daß der Zielreiz selbst eine Bewegung ausführt. Die Ansicht, eine Bewegung, die unabhängig vom Zielreiz ist, könne einen Interferenzeffekt auslösen, läßt sich aus einer Untersuchung von Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) ableiten. Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) ließ seine Versuchspersonen während einer mentalen Rotation eine Handkurbel bedienen. Die Richtung der Kreisbewegung, die von der Hand der Versuchsperson ausgeführt wurde, konnte kongruent oder inkongruent zur ausgeführten mentalen Rotationsrichtung sein. Es stellte sich heraus, daß die Bewegung eine starke Interferenz auf die mentale Rotation ausübt. Bei einer Übereinstimmung der Achsen, um die sowohl manuell als auch mental rotiert wurde, zeigte sich eine Beschleunigung der mentalen Rotation, wenn die Bewegungsrichtungen kongruent zueinander waren - im Gegensatz zur inkongruenten Bedingung, bei der sich eine Ver-

zögerung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit zeigte. Die Schlußfolgerung, dieser Befund deute auf eine starke Beteiligung des motorischen Systems während der mentalen Rotation hin (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) scheint gerechtfertigt. Es bleibt aber unklar, ob die motorische Ausführung einer Kreisbewegung für den Effekt verantwortlich ist, oder die Wahrnehmung einer Bewegung, die während einer Ausführung auch zweifellos stattfinden muß, dafür schon ausreichend ist.

Mit der vorliegenden Experimentalanordnung soll die Frage untersuchbar werden, ob eine Bewegungswahrnehmung den Interferenzeffekt auslösen kann. Wenn die gleichförmige Kreisbewegung des Punktes um den Zielreiz dafür ausreichend ist, bleibt wiederum die Frage ungeklärt, ob eine kontinuierliche Bewegung notwendig ist, oder ob schon in der Initialisierungsphase, bei der die Information über die Gestalt des Zielreizes *und* seine Bewegungsrichtung verarbeitet werden, der Interferenzeffekt zustande kommt.

### **3.2.2.1 Methode**

#### **3.2.2.1.1 Versuchspersonen**

20 Vpn nahmen an Experiment 2b teil. Von 2 Versuchspersonen wurde die maximale Fehlerzahl im Experiment überschritten (Vp Nr.1: 12% und Vp Nr. 2: 51% Fehler). Diese beiden Versuchspersonen wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Der Altersschnitt der verbleibenden Teilnehmergruppe lag bei 24 Jahren. Der jüngste Teilnehmer war 20 Jahre, der älteste 33 Jahre alt. Die Stichprobe enthielt 11 weibliche Vpn. Nach eigenen Angaben waren 17 Vpn Rechtshänder. Alle Vpn reagierten mit ihrer dominanten Hand. Die Normalsichtigkeit der Vpn wurde ebenfalls nach ihren eigenen Angaben festgestellt. Die Entlohnung der Vpn erfolgte wiederum in Form von Experimentalstunden (3,5 h) oder 35,-DM. Wie in den zuvor berichteten Experimenten war eine maximale Fehlerrate von 10% für das gesamte Experiment zuvor festgesetzt worden.

#### **3.2.2.1.2 Material**

Den Vpn wurden wie in den zuvor berichteten Experimenten die vier Buchstaben: F, L, R und P als Zielreize dargeboten. Neben dem einzelnen Zielreiz wurde zusätzlich ein Punkt auf dem Bildschirm präsentiert. Sowohl der Punkt als auch die Buchstaben waren weiß auf schwarzem Hintergrund dargestellt. Der Punkt hatte einen Durchmesser von 0,5 cm, was bei einem Abstand der Vp von 80cm vom Monitor einem Sehwinkelgrad von  $0,35^\circ$  entspricht. Die Buchstaben hatte die gleiche Größe wie in den zuvor berichteten Experimenten:  $1,43^\circ$  Höhe und  $1,07^\circ$  Breite.

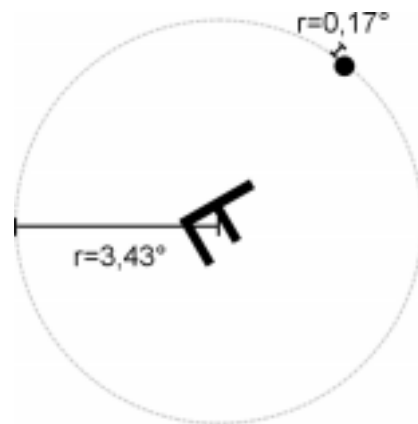


Abbildung 10: Die Abbildung gibt die Größenverhältnisse in Sehwinkelgrad an. Zu sehen ist der Zielbuchstabe, der auf Parität geprüft werden soll zusammen mit dem umlaufenden Punkt, den die  $V_p$  nach Möglichkeit ignorieren soll. Der Punkt konnte entweder mit oder gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Die Umlaufbahn ist angedeutet, im Experiment selbst jedoch nicht zu sehen.

Wesentlicher Unterschied zu den übrigen Experimenten war hier, daß der Zielbuchstabe statisch in der Mitte des Monitors dargestellt war. Währenddessen kreiste um diesen Stimulus ein Punkt. Der Punkt beschrieb während seiner Rotation um den Zielreiz entweder einen Kreis, dessen Radius dem der Umlaufbahn der Buchstaben in Experiment 1 und 2 entsprach: 5cm bzw.  $3,43^\circ$  Sehwinkel oder er wechselte seine Umlaufrichtung um den Zielreiz, nachdem er einen Viertelkreis (gleicher Radius wie der Vollkreis:  $3,43^\circ$  Sehwinkel) beschrieben hatte. Mit diesen beiden Bewegungsarten des Punktes wurde also eine Kombination des Experiments 2 und 3 erreicht - mit dem entscheidenden Unterschied, daß hier der Zielbuchstabe keinerlei Bewegung ausführte. Die Umlaufgeschwindigkeit war für beide Bewegungsarten gleich bzw. identisch mit den zuvor berichteten Experimenten: in der Bedingung „gleichförmige Kreisbewegung“ beschrieb er in einer Sekunde vollständigen Kreis (dies entspricht  $360^\circ/s$ ), in der Bedingung „Pendelbewegung“ führte er einen Viertelkreis in 250ms aus.

### 3.2.2.1.3 Prozedur

Nachdem die Versuchsperson instruiert worden war, den dargebotenen Buchstaben auf seine Parität hin zu beurteilen und den umkreisenden Punkt möglichst zu ignorieren und dann so schnell und sorgfältig wie möglich zu reagieren, wurde einmalig ein Trainingsblock zu Beginn des Experiments mit 16 Trials dargeboten. Sowohl diese Aufgaben, als auch die zu Beginn jeden Blocks dargebotenen 5 „warming up“-Trials wurden nicht ausgewertet.

Der Faktor „Kongruenz“ wurde aus der Kombination der Winkeldisparität und der Drehrichtung des Zielbuchstabens wie in den Experimente 1a, 1b und 2a gebildet. Hierfür wurde bei der Pendelbewegung des Zielreizes, die erste gezeigte Bewegungsrichtung zugrundegelegt.

Netto wurden 2304 Einzelaufgaben (abzüglich der „warming up“-Trials) präsentiert, die sich aus der folgenden Kombination der Experimentalfaktoren und deren Stufen ergeben:

$4(\text{Buchstaben}) \times 18(\text{Winkel}) \times 2(\text{Versionen}) \times 2(\text{Bewegungsarten}) \times 2(\text{Kongruenz}) = 576$  Einzelaufgaben. Die Einzelaufgaben wurden in 4 Wiederholungen dargeboten, woraus sich dann die Gesamtzahl der Aufgaben von 2304 ergibt. Die reine Experimentaldauer betrug ca. 3,5 h pro Versuchsperson. Auch hier war die Darbietung der Einzelaufgaben in 144 Blöcke von jeweils 16

Aufgaben unterteilt. Die Bewegungsrichtung des Punktes (gleichförmige- vs. Pendelbewegung) wechselte mit dem Block. Alle übrigen Experimentalfaktoren waren nicht an die Blockstruktur gebunden. Die Startposition, die nun den Startpunkt für die beginnende Bewegung des Punktes bestimmte, war wie zuvor über alle Experimentalfaktoren ausbalanciert.

Die Vpn reagierten indem sie eine von zwei Reaktionstasten („normal“ oder „gespiegelt“) drückten. Die Bewegung des Punktes wurde erst dann unterbrochen wenn die Vp reagierte.

Die Abhängige Variable war erneut die Zeit, die zwischen der Darbietung des Zielbuchstabens bis zur Reaktion der Vp verging. Zusätzlich wurde noch die Richtigkeit der Reaktion erfaßt.

#### 3.2.2.1.4 Auswertung

Die mittlere Reaktionszeit und die mittlere Fehlerrate wurde für die jede der Bedingungen (Winkeldisparität, Bewegungsart und Kongruenz) und jede Versuchsperson getrennt berechnet. Es gingen (außer zu Fehleranalyse) nur die richtigen Reaktionen in die Auswertung ein. Alle experimentelle Faktoren (Winkeldisparität 18fach gestuft; Bewegungsrichtung 2fach gestuft; Kongruenz 2fach gestuft) wurden als within-subject Effekte definiert<sup>8</sup>.

### 3.2.2.2 Ergebnisse

#### 3.2.2.2.1 Fehlerraten

Neben der Winkeldisparität ( $F(17, 323) = 16,84; \epsilon = 0,22$ ) wurde die Fehlerrate nur noch von dem Faktor „Bewegungsart“ des Zielreizes signifikant beeinflusst ( $F(1, 19) = 7,38; p < 0,013$ ). Führt der Punkt eine gleichförmige Kreisbewegung um den Zielreiz aus, so produzierten die Versuchspersonen im Mittel 5,8 % Fehler - im Gegensatz zu der Pendelbewegung des Zielreizes, bei der sie 6,3% Fehler produzierten. Alle übrigen experimentellen Faktoren beeinflussten nicht die Zahl der Fehler.

---

<sup>8</sup> Die Analyse getrennt für die beiden Versionen des Zielreizes erbrachte, wie in den zurückliegenden Experimenten folgendes Resultat: Der Haupteffekt „Version“ wurde signifikant ( $F(1, 19) = 46,85; p < 0,0001$ ). Die gespiegelte Version des Zielreizes wurde im Mittel nach 742,4 ms korrekt beantwortet und der normal dargestellte Zielreiz bereits nach 632,7 ms. Neben einer signifikanten Interaktion der Version mit der Winkeldisparität des Zielreizes ( $F(17, 323) = 5,58; p < 0,0001; \epsilon = 0,21$ ) wurde keine andere Interaktion mit diesem Faktor signifikant (siehe hierzu Koriat & Norman (Koriat & Norman, 1985)). Wiederum wurden alle Daten daraufhin über den Faktor „Version“ gemittelt.



Tabelle 13: Experiment 2b - Mittlere Fehlerrate (%) getrennt für die Faktoren Winkeldisparität und Bewegungsart des Zielreizes.

		<i>Winkeldisparität</i>						
Bedingung	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
<i>Gleichförmig</i>	3,3	3,3	3,9	3,4	4,0	5,0	6,8	9,2
<i>Pendelbewegung</i>	3,2	3,3	3,4	3,2	4,6	6,1	7,5	11,6

		<i>Winkeldisparität</i>						
Bedingung	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
<i>Gleichförmig</i>	10,0	10,3	8,7	8,7	6,0	5,6	3,9	3,9
<i>Pendelbewegung</i>	11,2	12,2	9,9	8,4	6,5	5,5	4,5	4,0

		<i>Winkeldisparität</i>	
Bedingung	320°	340°	
<i>Gleichförmig</i>	3,3	2,9	
<i>Pendelbewegung</i>	3,7	3,4	

### 3.2.2.2.2 Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten wurden wiederum von der Winkeldisparität des Zielreizes signifikant beeinflusst ( $F(17, 323) = 46,6$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,14$ ). Daneben zeigte sich nur die zweifache Interaktion der Winkeldisparität und der Bewegungsart des Punktes als bedeutsam ( $F(17, 323) = 2,16$ ;  $p < 0,04$ ). Die Art dieser Wechselbeziehung ist in der folgenden Abbildung 11 dargestellt.

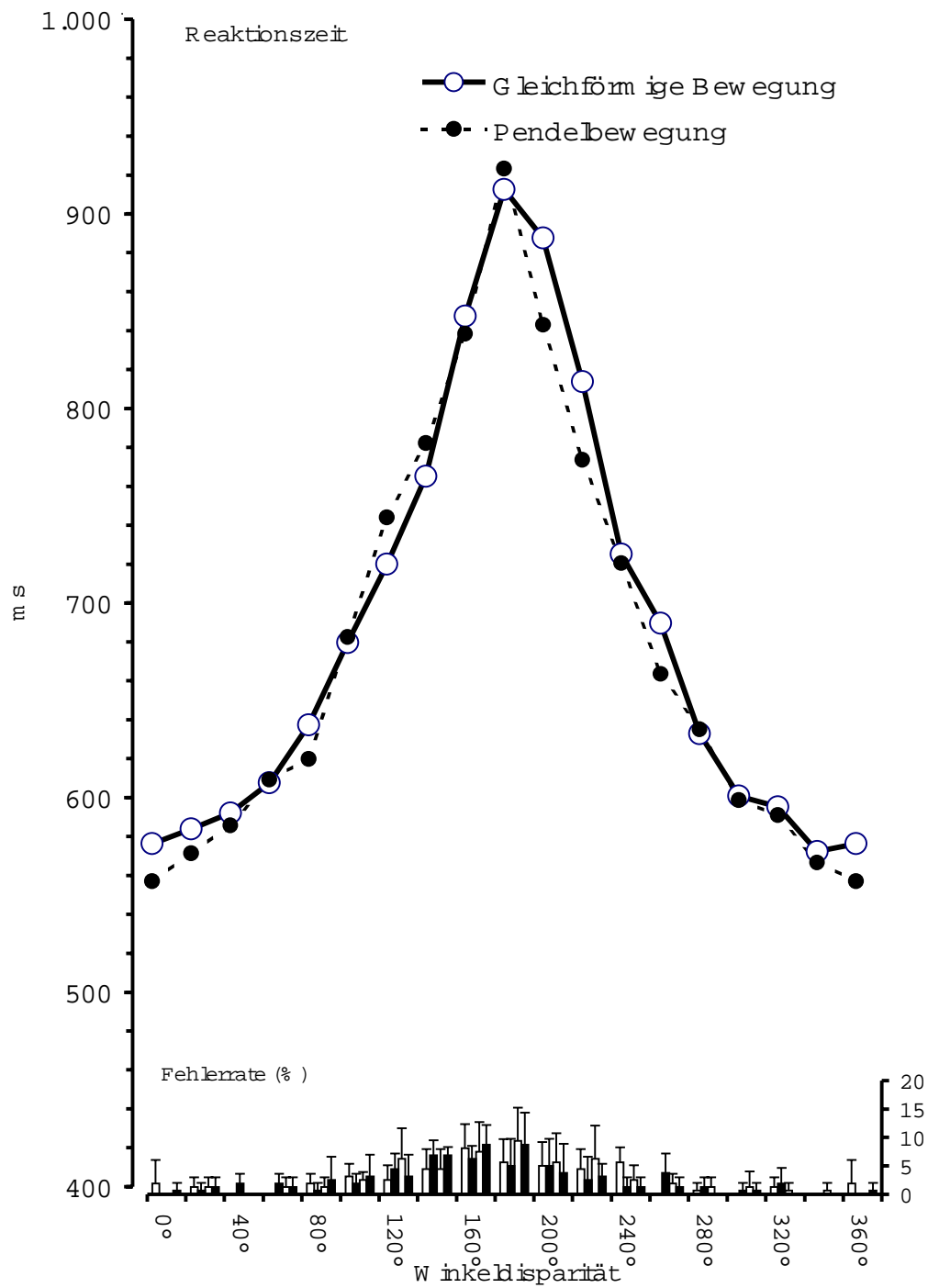


Abbildung 11: Experiment 2b - Mittlere Reaktionszeit als Funktion der Winkeldisparität und der Bewegungsart des Punktes.

In der nachfolgenden Abbildung 12 ist der Verlauf der Reaktionszeit als Funktion aller experimentelle Faktoren dargestellt.

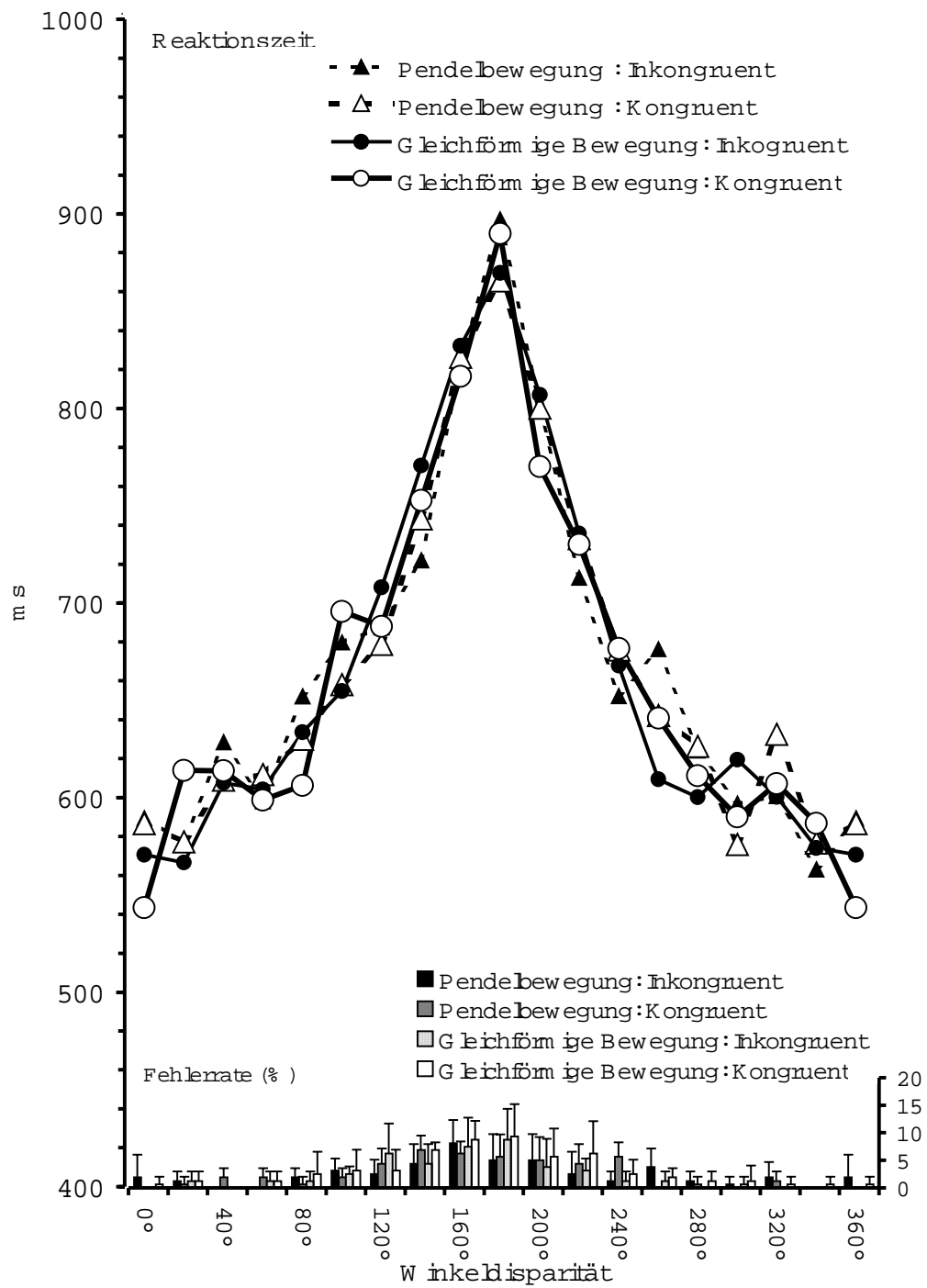


Abbildung 12: Experiment 2b - Dargestellt sind die mittleren Reaktionszeiten als Funktion aller experimentellen Faktoren. Lediglich die Winkeldisparität wurde signifikant.

In der Tabelle 12 sind die mittleren Reaktionszeiten für die verschiedenen Winkeldisparitäten wiedergegeben.

Tabelle 13: Experiment 2b - Mittlere Reaktionszeiten für die verwendeten Winkeldisparitäten.

<i>Winkeldisparität</i>							
0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
560	575	589	600	619	665	703	755

<i>Winkeldisparität</i>							
160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
824	890	824	765	699	655	621	591

<i>Winkeldisparität</i>	
320°	340°
585	566

Eine anschließende Analyse mit den äquivalenten Winkelstrecken, sowie den eliminierten Winkeldisparitäten von 0° und 180° erbrachte keine neuen Erkenntnisse - lediglich der Faktor der Winkeldisparität erwies sich als signifikant ( $F(7, 133) = 50,58$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\varepsilon = 0,18$ ). Die nachfolgende Abbildung 13 verdeutlicht dies noch einmal graphisch.

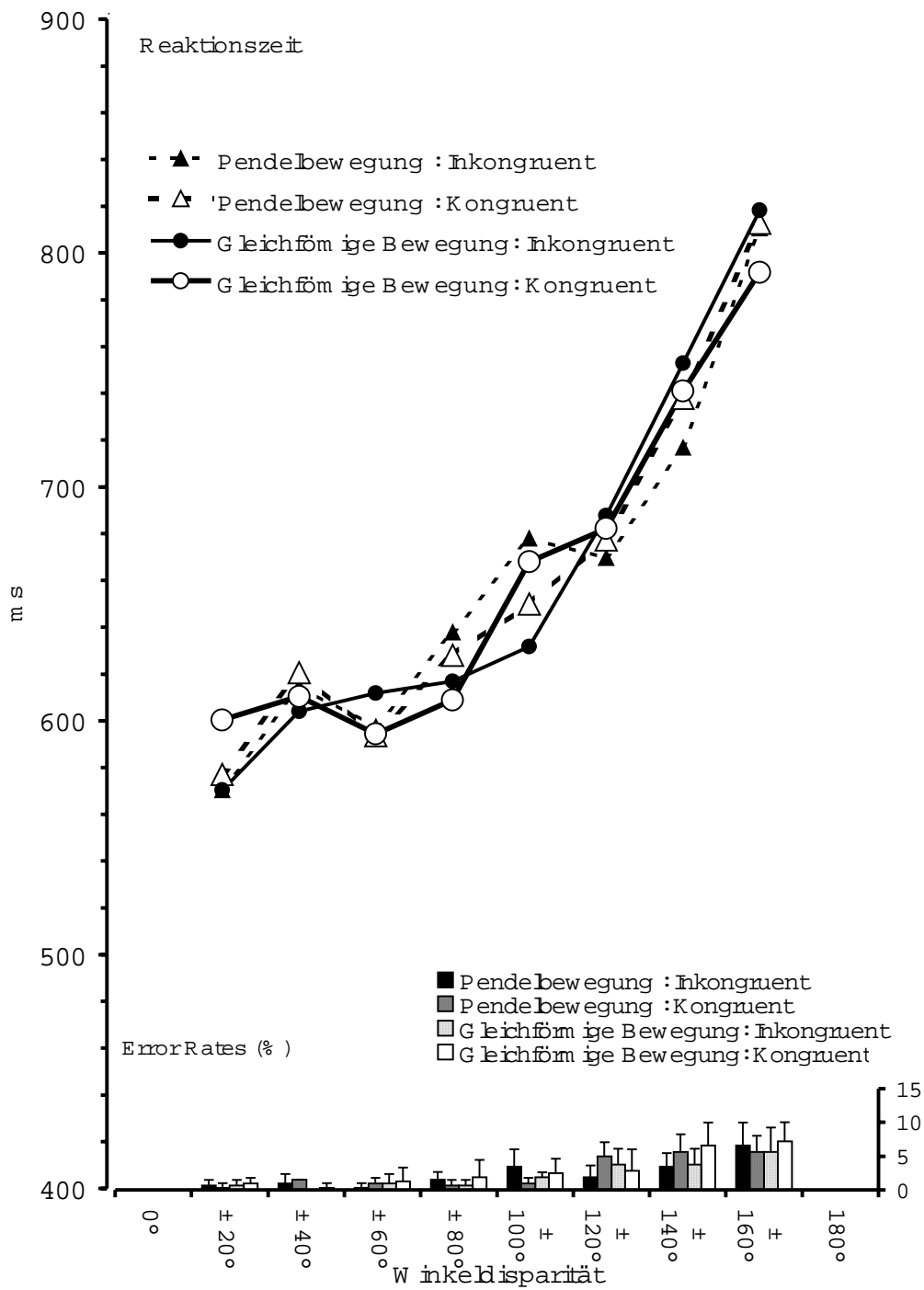


Abbildung 13: Experiment 2b - Mittlere Reaktionszeit als Funktion aller experimentelle Faktoren ohne die arbiträr definierten minimalen und maximalen Winkelabweichungen. Äquivalente Winkeldisparitäten sind zusammengefaßt. Nur der Faktor „Winkeldisparität“ erwies sich als signifikant.

### 3.2.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Welchen Einfluß übt die Wahrnehmung einer Bewegung auf die mentale Rotation eines statisch dargebotenen Zielreizes aus? Um dieser Frage nachzugehen wurde neben dem statischen Zielreiz ein Punkt dargeboten, sich der um den Zielreiz kreisförmig bewegte.

Erwartungsgemäß zeigte sich auch hier ein deutlicher Winkeleffekt. Ein Kongruenzeffekt konnte jedoch nicht beobachtet werden. D.h. unabhängig davon, ob der Punkt eine kongruente oder inkongruente Bewegung ausführte, wirkte sich dies nicht auf die mentale Rotation aus.

Weiterhin wurde auch die Art der Bewegung, die der Punkt ausführte variiert. Es hätte vermutet werden können, daß die gleichförmige Bewegung des Punktes der mentalen Rotation *ähnlicher* sei, als die Pendelbewegung. Dies hätte dazu führen können, daß bei der Betrachtung einer gleichförmigen Bewegung ein Einfluß auf die mentale Rotation zu beobachten ist. Die erste Analyse der Daten zeigte dann auch eine Interaktion der Bewegungsart mit der Winkeldisparität. In der Abbildung 13 ist eine leichte Verkürzung der Reaktionszeiten für kleinere Winkeldisparitäten ( $< 180^\circ$ ) zu beobachten, wenn der Punkt eine gleichförmige Bewegung ausführt. Dieser Vorteil kehrt sich bei Winkeldisparitäten  $> 180^\circ$  um, und die Reaktionszeiten verlangsamten sich. Bei der Zusammenlegung der äquivalenten Winkelstrecken und vor allem der Eliminierung der arbiträr definierten Kongruenzen von  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , zeigt sich diese Interaktion nicht mehr.

Die Daten deuten demnach daraufhin, daß die Wahrnehmung einer Bewegung, die nicht an den Zielreiz selbst gekoppelt ist, nicht ausreicht, die mentale Rotationsgeschwindigkeit zu verändern. Der Interferenzeffekt, der in Experiment 1a und 1b sichtbar wurde, ist demnach nicht darauf zurückzuführen, daß lediglich eine *Bewegung* wahrgenommen wird. Vielmehr scheint es so zu sein, daß der Zielreiz selbst eine Bewegung ausführen muß, um eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit zu bewirken.

### 3.3 Dritter Teil: Untersuchung des Interferenzparadigmas mit Hilfe der AFM

Die von Sternberg (Sternberg, 1969) entwickelte Additive-Faktoren-Methode (AFM) bietet eine Möglichkeit zur Identifizierung von Verarbeitungsstufen. Die Grundidee beruht darauf, Reaktionszeiten als Summe von Teilprozessen zu betrachten, die jeweils eine bestimmte Dauer haben. Sternberg (Sternberg, 1969) ging dabei davon aus, daß die Verarbeitungsstufen *diskret* sind und jede Verarbeitungsstufe erst dann beginnen kann, wenn die unmittelbar vorangehende abgeschlossen ist (sequentiell). Dabei sollten zwei experimentelle Faktoren, die *verschiedene* Verarbeitungsstufen beeinflussen, *additive* Effekte auf die Gesamtreaktionszeit haben. Auf der anderen Seite, deutet eine *Interaktion* der beiden Faktoren darauf, daß sie *mindestens eine gemeinsame* Verarbeitungsstufe beeinflussen. Daraus folgt, daß eine Interaktion zweiter Ordnung (bei drei experimentellen Faktoren) ein Hinweis darauf ist, daß alle drei Faktoren, mindestens eine Stufe gemeinsam beeinflussen. In der Abbildung 14 ist dieser Gedankengang graphisch dargestellt.

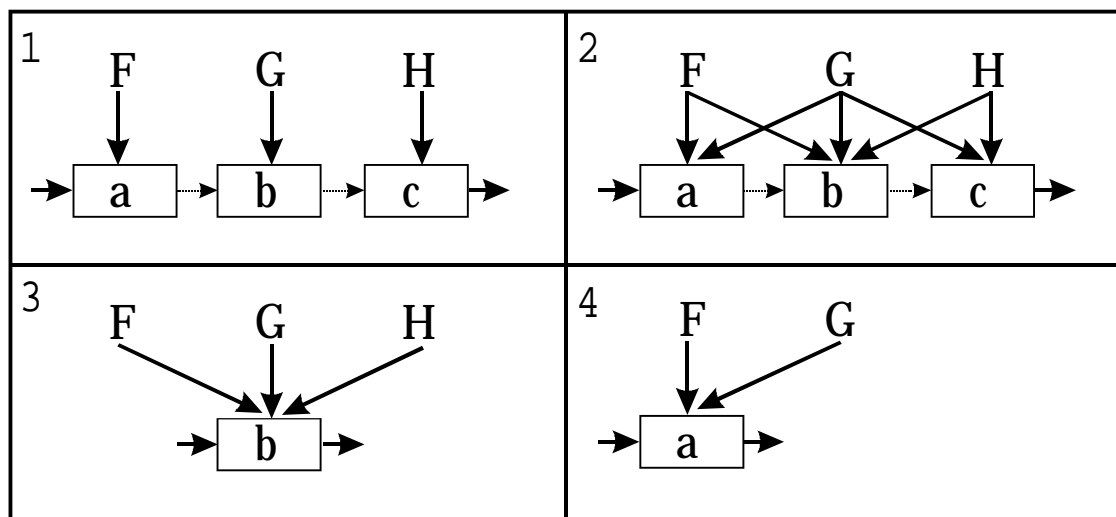


Abbildung 14: Die Logik der Additiven-Faktoren-Methode von Sternberg (Sternberg, 1969). Additive Effekte der Faktoren (F, G, H) legen separate Verarbeitungsstufen nahe (1). Interaktionen hingegen legen mindestens eine gemeinsame Verarbeitungsstufe nahe. Eine Interaktion zweiter Ordnung hingegen legt nahe, daß alle drei Faktoren eine gemeinsame Stufe beeinflussen. [Nach: Sternberg (1969). *The discovery of processing satges: Extensions of Donder's method. Acta Psychologica, 30, 276-315*]

Sternbergs (Sternberg, 1969) diskretes Modell wurde einer ganzen Reihe kritischer Untersuchung unterzogen. Das Hauptargument vieler Kritiker bezog sich darauf, daß die Postulierung eines diskreten Verarbeitungsmodells inplausibel erscheint, Angesicht der hohen Vernetzung des neuronalen Systems. Auch wurden Befunde berichtet, die eher eine Überlappung der Verarbeitungsstufen nahelegen, die Sternbergs Modell ja gerade ausschließt. Meyer, Osman, Irwin und Yantis (Meyer, Osman, Irwin, & Yantis, 1988; Miller, 1988; Sanders, 1990) argumentierten jedoch, daß viele dieser Argumente unbegründet seien, bzw. die Vorhersagen des Modells nicht immer korrekt abgeleitet wurden. Vielmehr scheinen eine ganze Reihe von Untersuchungen das diskrete Modell zu stützen (Sanders, 1980; Sanders, 1983; Sternberg, 1975). Für die vorliegende Untersuchung wird die Additive-Faktoren-Methode von Sternberg (Sternberg, 1969) in einem Bereich eine Anwendung finden, die aufgrund der gewählten experimentellen Faktoren, wenig Anlaß für die Verwendung eines anderen als eines diskreten Modells bietet: Mit Hilfe der AFM soll untersucht werden, ob der berichtete Interferenzeffekt auf der selben Verarbeitungsstufe wie die mentale Rotation ansetzt, oder ob die Interferenz auf einer früheren, perzeptuellen Stufe der Verarbeitung bereits anzusiedeln ist. Hierbei wird ein weiterer experimenteller Faktor eingeführt (Stimulus-Diskriminabilität), von dem angenommen werden darf, daß er perzeptuelle Eigenschaften des Stimulus moduliert. Von der Identifikation eines Reizes wiederum kann angenommen werden, daß sie der mentalen Rotation vorangeht - auch wenn, wie Ruthruff und Miller (Ruthruff & Miller, 1995) zeigen konnten, eine leichte Überlappung der Stufe der perzeptuellen Verarbeitung und der mentalen Rotation nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

### **3.3.1 Experiment 3: Analyse der Verarbeitungsstufen**

Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982) entwickelten für die mentale Rotation ein Stufenmodell, welches insgesamt aus 7 Stufen der Verarbeitung besteht. Sie stellen darin voran, daß noch bevor der Zielreiz sichtbar wird, die Versuchsperson eine Reaktionsinitialisierung für die Antwort „normal“ durchführt. Nach der Präsentation des Zielreizes, werden die Stufen 2 und 3 teilweise parallel ausgeführt. In der zweiten Stufen wird die Identität des Zielreizes fest-



gestellt und in der dritten Stufe seine Orientierung. Beide Stufen senden ihre (Teil-)Ergebnisse an die sich anschließende vierte Stufe - die eigentliche mentale Rotation. Hier wird der Zielreiz schrittweise in seine aufrechte Position ( $0^\circ$ ) mental gedreht. Diese vierte Stufe ist aufgrund ihres Arbeitsprinzips verantwortlich für den charakteristischen Verlauf der Reaktionszeit-Winkelfunktion: Je weiter der Zielreiz von seiner aufrechten Normalausrichtung entfernt ist, desto mehr Zeit wird für seine Re-Orientierung benötigt. Die fünfte Stufe hat die Aufgabe den nun aufrechten Reiz mit dem gelernten, und im Langzeitspeicher vorliegenden Original zu vergleichen. Je nachdem ob die „match“ vorliegt, d.h. der Reorientierte Reiz stimmt mit der gelernten Version des Reizes überein, oder ein „mismatch“, d.h. die Re-Orientierung hat einen gespiegelten Reiz als Resultat, wird entweder sofort reagiert (7. Stufe) , oder es wird die motorische Reaktion Initialisiert (6. Stufe), die anzeigt, daß ein gespiegelter Zielreiz vorgelegt wurde. Hiernach erfolgt auch für diesen Fall die Reaktion (7. Stufe). Das Modell ist in der folgenden Abbildung mit den von Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982) veranschlagten Teil-Zeiten für die einzelnen Stufen dargestellt, deren Summe die Gesamtreaktionszeit darstellt.

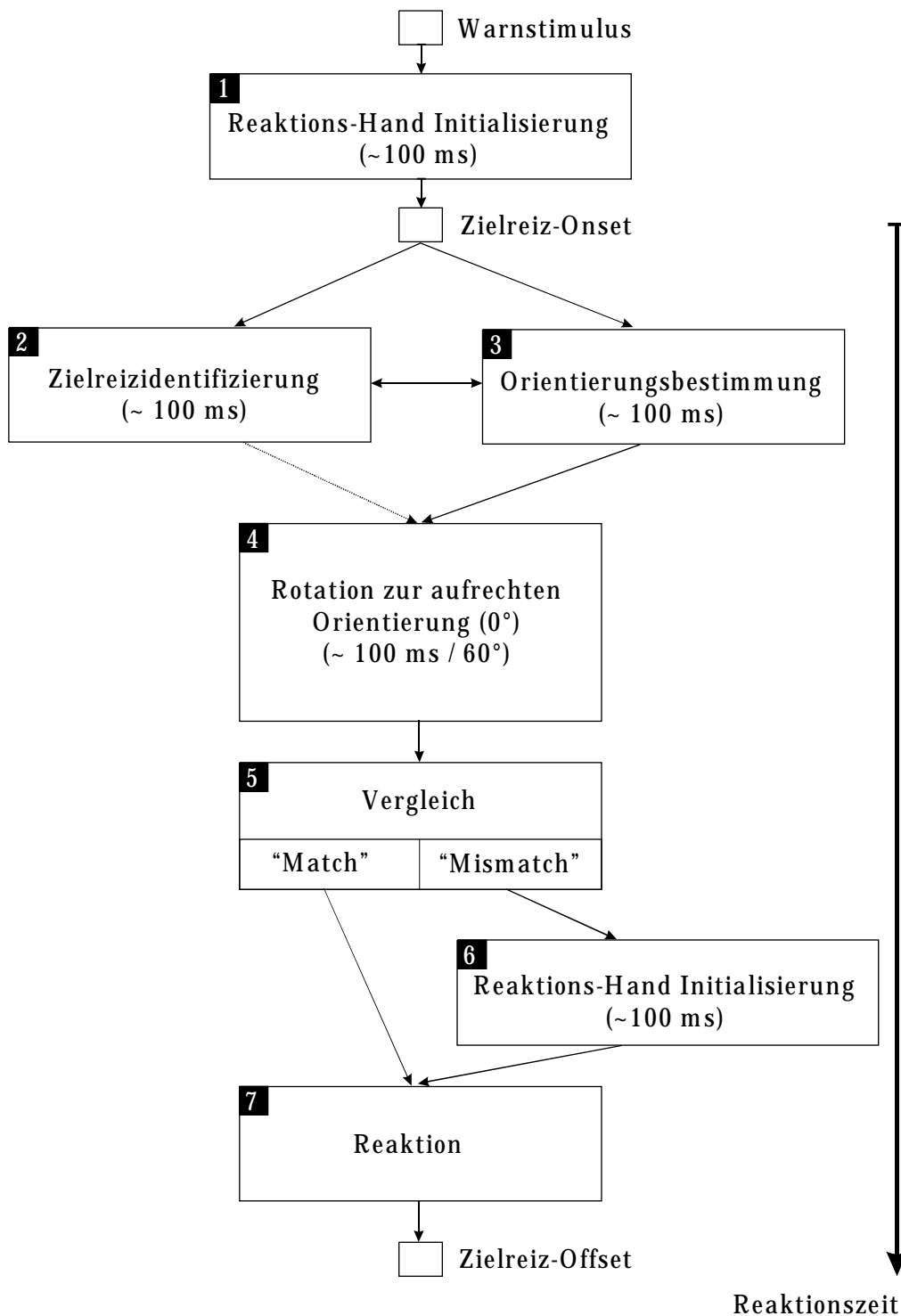


Abbildung 15: Modell einer stufenorientierten Verarbeitung der mentalen Rotation von Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982). [nach: Shepard (Shepard & Cooper, 1982) *Mental Images and their Transformations*, MIT Press, 1982]

Die Ergebnisse aus Experiment 1a und 1b legen nun nahe, daß der Interferenzeffekt auf der gleichen Stufe ansetzt, wie der Effekt der Winkeldisparität. Dies ist in dem Modell von Shepard und Cooper (Shepard & Cooper, 1982) die Stufe 4. Einer Manipulation der Diskriminierbarkeit des Zielreizes würde dementsprechend auf einer früheren Stufe ansetzen: Ist der Zielreiz schwer zu diskriminieren, so sollte dies in einer Verlängerung der Identifizierung des Zielreizes führen. Ist er hingegen leicht (oder leichter) zu diskriminieren, so sollte sich die Verarbeitungszeit für diese Stufe verkürzen. In keinem Fall hingegen sollte sich dadurch die mentale Rotationsgeschwindigkeit ändern. Eine leichtere Diskriminierbarkeit sollte nicht in einer schnelleren Rotationsgeschwindigkeit resultieren - bzw. eine schwerere Diskriminierbarkeit sollte nicht in einer langsameren Rotationsgeschwindigkeit resultieren. Die Variation der Stufe 2 ist der mentalen Rotation vorangestellt und die dort wirksamen Effekte sollte den Achsenabschnitt beeinflussen, die Steigung der Reaktionszeit-Winkelfunktion hingegen sollte unbeeinflusst bleiben. Bei der Betrachtung des Faktors Kongruenz hingegen ist zu erwarten, daß er auf der gleichen Stufe wie die Winkeldisparität ansetzt.

Im Sinne der Additiven-Faktoren-Methode ist bei einer Hinzufügung eines dritten experimentellen Faktors (Diskriminierbarkeit des Zielreizes), neben den schon bestehenden Faktoren Winkeldisparität und Kongruenz folgendes varianzanalytisches Ergebnis zu erwarten: Der Faktor Diskriminierbarkeit sollte mit keinem der anderen beiden Faktoren interagieren. Die Faktoren Winkeldisparität und Kongruenz hingegen sollten miteinander interagieren. Dabei ist vorausgesetzt, daß alle drei Faktoren als Haupteffekte signifikant werden.

### **3.3.1.1 Methode**

#### **3.3.1.1.1 Versuchspersonen**

An dem Experiment 3 nahmen insgesamt 48 Versuchspersonen teil. Davon waren 33 Versuchspersonen weiblich. Der Altersdurchschnitt lag hier bei 24 Jahren (19 bis 33 Jahre). Der An-

diesem Experiment wurde mit 4,5 Experimentalstunden (oder ersatzweise mit 45,- DM) vergütet. Auch in dieser Untersuchung lag die maximale Fehlergrenze bei 10%. Keiner der Teilnehmer überschritt diesen Maximalwert, somit konnten alle Versuchspersonen in die Auswertung genommen werden.

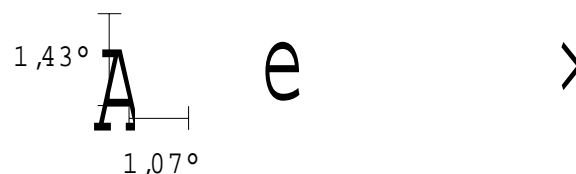
### 3.3.1.1.2 Material

Im Unterschied zu den vorangegangenen Untersuchungen wurde den Versuchspersonen innerhalb eines Blocks ein Buchstabe aus einem 2er Set präsentiert. Dieses 2er Set konnte einmal 2 Buchstaben enthalten, die relativ einfach voneinander zu diskriminieren waren oder aufgrund einer Ähnlichkeit in der Form, eher schwer zu voneinander zu diskriminieren waren. Je nach dem, wie dieses Set zusammengestellt war, bildete dies die Bedingung „Diskrimination: schwer“ oder „Diskrimination: einfach“. Die Zusammensetzung der Zielreize ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

*Tabelle 14: Experiment 3 - Die Kombination der Buchstaben-Sets. Innerhalb eines Blocks wurde jeweils nur eine der unten dargestellten Zelle präsentiert.*

<b>Diskrimination</b>	
Leicht	Schwer
„F“ und „g“ (oder „e“) <sup>9</sup>	„F“ und „7“
„7“ und „g“ (oder „e“)	„e“ und „g“

Diese Anordnung der Zielreize erfordert von der Versuchsperson, daß sie zunächst die Identität des Buchstabens feststellt, *bevor* sie die mentale Rotation ausführt. D.h. in solch einer Situation kann man davon ausgehen, daß obwohl keine explizite Aufforderung zur Identifizierung des Zielbuchstabens gegeben wurde, die Versuchspersonen für eine korrekte Paritätsentscheidung diesen Teilschritt vor der mentalen Rotation erledigten. Die nächste Abbildung zeigt die tatsächlich verwendeten Buchstaben. Bei der Konstruktion dieser Zielreize wurde versucht, die Sets „F“ und „7“ und auf der anderen Seite „g“ und „e“ ähnlich erscheinen zu lassen. Dieses Vorgehen gewährleistet, daß z.B. die „7“ einem um 180° gedrehten, gespiegelt dargestellten „F“ ähnlich sieht.



*Abbildung 16: Experiment 3 - Darstellung der verwendeten Stimuli. Alle Buchstaben sind in ihrer aufrechten Position (0°) und normal gezeigt. Die Größe (in Grad Sehwinkel entspricht der, die in den Experimenten 1a, 1b, 2a und 2b verwendet wurde. Jeweils zwei Buchstaben bilden ein Set, welches innerhalb eines Blocks präsentiert wurde.*

<sup>9</sup> Jede zweite Versuchsperson bekam das „g“ als zweites Element des Sets dargeboten. Die übrigen Versuchspersonen erhielten das „e“ als zweites Element des Sets. Dieses Vorgehen galt wurde auch für die zweite Bedingung „Diskrimination: leicht“ gewählt.

Die Zielreize wurden weiß auf schwarzem Grund dargestellt. Die Versuchspersonen saßen während der Untersuchung ca. 80 cm vom Darbietungsmonitor entfernt.

### 3.3.1.1.3 Prozedur

Es wurden 18 Stufen des experimental Faktors „Winkeldisparität“ realisiert: 0° bis 340° in 20° Schritten. Weiterhin wurde erneut der Faktor „Kongruenz“ aus der Kombination der Winkeldisparität und der Drehrichtung des Zielbuchstabens wie in allen vorangegangenen Experimenten gebildet. Der neue dritte Faktor „Diskriminabilität“ (gut vs. schlecht) wurde wie in der Tabelle 15 dargestellt, gebildet.

Die Experimentalsitzung bestand aus insgesamt 2304 Einzelaufgaben. Dies ergibt sich aus der vollständigen Kombination der Experimentalfaktoren:

$2(\text{Buchstaben}) \times 2(\text{Diskriminabilität}) \times 18(\text{Winkel}) \times 2(\text{Versionen}) \times 2(\text{Kongruenz}) = 288$  Einzelaufgaben. Die Einzelaufgaben wurden wiederum in 8 Wiederholungen dargeboten, woraus sich dann die Gesamtzahl der Aufgaben von 2304 ergibt. Die reine Experimentaldauer betrug ca. 4,5 h pro Versuchsperson.

Insgesamt wurden 4 große Blöcke dargeboten, die jeweils in 16 kleine Blöcke unterteilt waren. Der experimental Faktor „Diskriminabilität“ wurde geblockt dargeboten - was den 4 großen Blöcken entsprach. Dabei wurde darauf geachtet, daß die Reihenfolge der Blöcke (z.B. leicht, schwer, leicht, schwer) über die Versuchspersonen ausbalanciert war.

Vor der Darbietung des ersten Blocks wurden wiederum 16 Aufgaben präsentiert, die nicht in die Auswertung kamen. Sie dienten der Übung für die Versuchsperson. Vor jedem weiteren großen Block wurden 5 dieser Übungsdurchgängen präsentiert, bevor die eigentliche Aufzeichnung begann.

Die Vp wurde instruiert so schnell wie möglich die Parität des Buchstabens zu beurteilen und dabei möglichst Fehlentscheidungen zu vermeiden. Die weitere Prozedur sowie der zeitliche Ablauf der Bildschirmereignisse innerhalb einer Einzelaufgabe entsprach dem Experiment 1a.

Als abhängige Variabel wurden die Reaktionszeit (äquivalente Meßstrecke wie in Experiment 1a) und die Antwort („normal“ oder „gespiegelt“) pro Einzelaufgabe aufgezeichnet.

### 3.3.1.1.4 Auswertung

Die mittlere Reaktionszeit und die mittlere Fehlerrate wurde für die jede der Bedingungen (Winkeldisparität, Kongruenz und Diskriminabilität) und jede Versuchsperson getrennt berechnet. Es gingen (außer zu Fehleranalyse) nur die richtigen Reaktionen in die Auswertung ein. Alle experimentelle Faktoren (Winkeldisparität 18fach gestuft; Kongruenz 2fach gestuft, Version 2fach gestuft und Diskriminabilität 2fach gestuft) wurden als within-subject Effekte definiert.

### **3.3.1.2 Ergebnisse**

#### 3.3.1.2.1 Fehlerraten

Der Faktor „Version des Zielreizes“ beeinflusste die Zahl der richtig entschiedenen Paritätsentscheidungen ( $F(1, 47) = 193,38; p < 0,0001$ ). Bei gespiegelt dargestellten Stimuli machten die Versuchspersonen im Mittel 4,8% Fehler, im Gegensatz zu normal dargestellten Stimuli, wo sie nur 3,6% Fehler produzierten. Die Fehlerrate wurde auch von der Winkeldisparität signifikant beeinflusst ( $F(17, 799) = 193,47; p < 0,0001; \epsilon = 0,29$ ). Daneben beeinflusste der auch der Faktor „Diskriminabilität“ die Fehlerrate ( $F(1, 47) = 14,15; p < 0,0005$ ). Hier zeigte sich, daß schwer zu diskriminierende Reize im Mittel zu 4,7% Fehler führten, leicht zu diskriminierende Reize hingegen nur zu 3,7 % Fehler führten. Alle übrigen experimentellen Faktoren oder deren Interaktionen führten nicht zu einer signifikanten Beeinflussung der Fehlerrate.

#### 3.3.1.2.2 Reaktionszeiten

Wie erwartet, zeigte sich ein starker Einfluß der Winkeldisparität auf die Reaktionszeiten ( $F(17, 799) = 200,4; p < 0,0001; \epsilon = 0,34$ ). Daneben zeigte auch die Diskriminierbarkeit der Zielreize einen signifikanten Einfluß auf die Reaktionszeiten ( $F(1, 47) = 15,28; p < 0,0003$ ). In der folgenden Abbildung ist diese Abhängigkeit der Reaktionszeiten dargestellt.

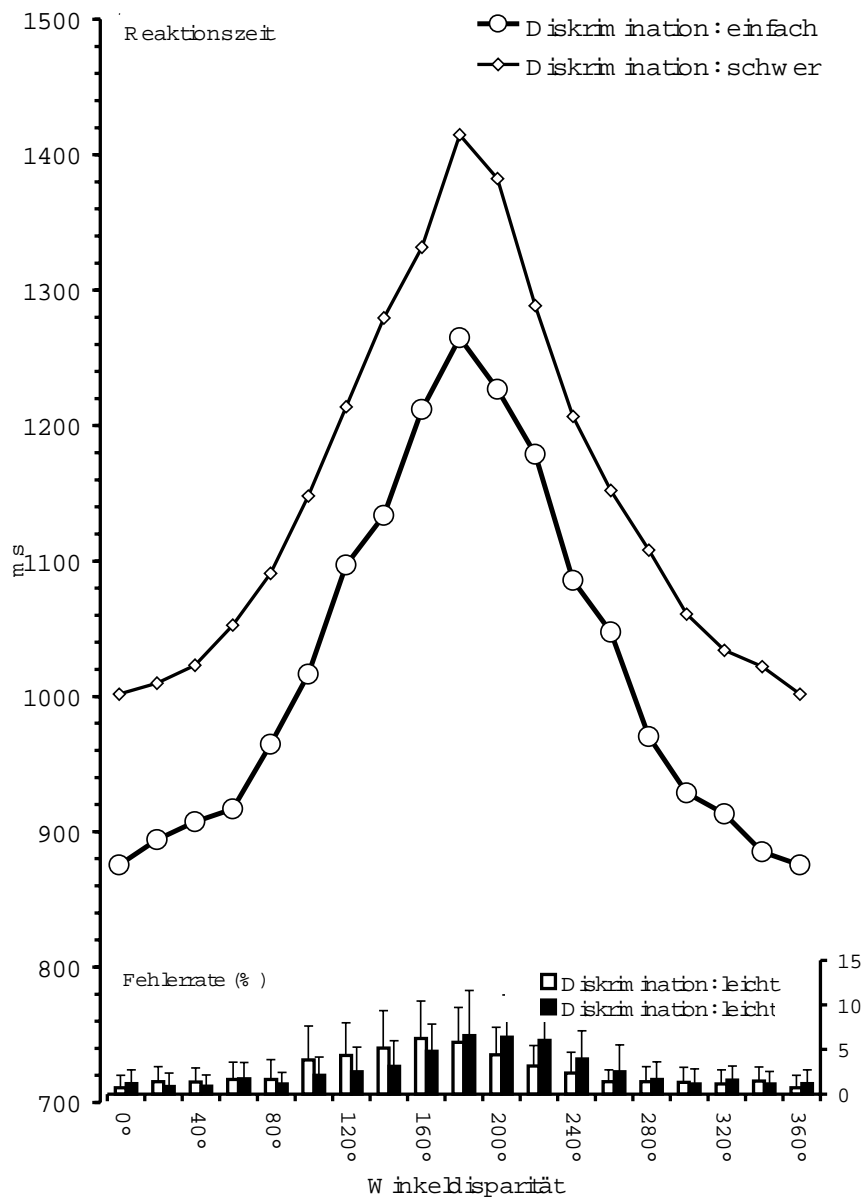


Abbildung 17: Experiment 3 - Mittlere Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der Diskriminierbarkeit der Zielreize.

Die mittleren Reaktionszeiten, getrennt für beide Faktoren finden sich auch in der nachfolgenden Tabelle 18.

Tabelle 16: Experiment 3 - Mittlere Reaktionszeiten getrennt für Winkeldisparität und Diskriminierbarkeit.

<i>Winkeldisparität</i>								
<i>Diskrimination</i>	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
<i>Schwer</i>	1013	1013	1028	1066	1096	1152	1210	1287
<i>Leicht</i>	889	905	935	950	996	1035	1121	1168

<i>Winkeldisparität</i>								
<i>Diskrimination</i>	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
<i>Schwer</i>	1334	1424	1394	1291	1224	1166	1116	1063
<i>Leicht</i>	1260	1302	1255	1223	1120	1079	992	951

<i>Winkeldisparität</i>		
<i>Diskrimination</i>	320°	340°
<i>Schwer</i>	1034	1027
<i>Leicht</i>	936	901

Daneben fand sich, daß auch der Faktor Kongruenz als Haupteffekt signifikant wurde ( $F(1, 47) = 107,53$ ;  $p < 0,0001$ ). Seine Interaktion mit der Winkeldisparität ( $F(17, 799) = 9,45$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,61$ ) ist in der Abbildung dargestellt.



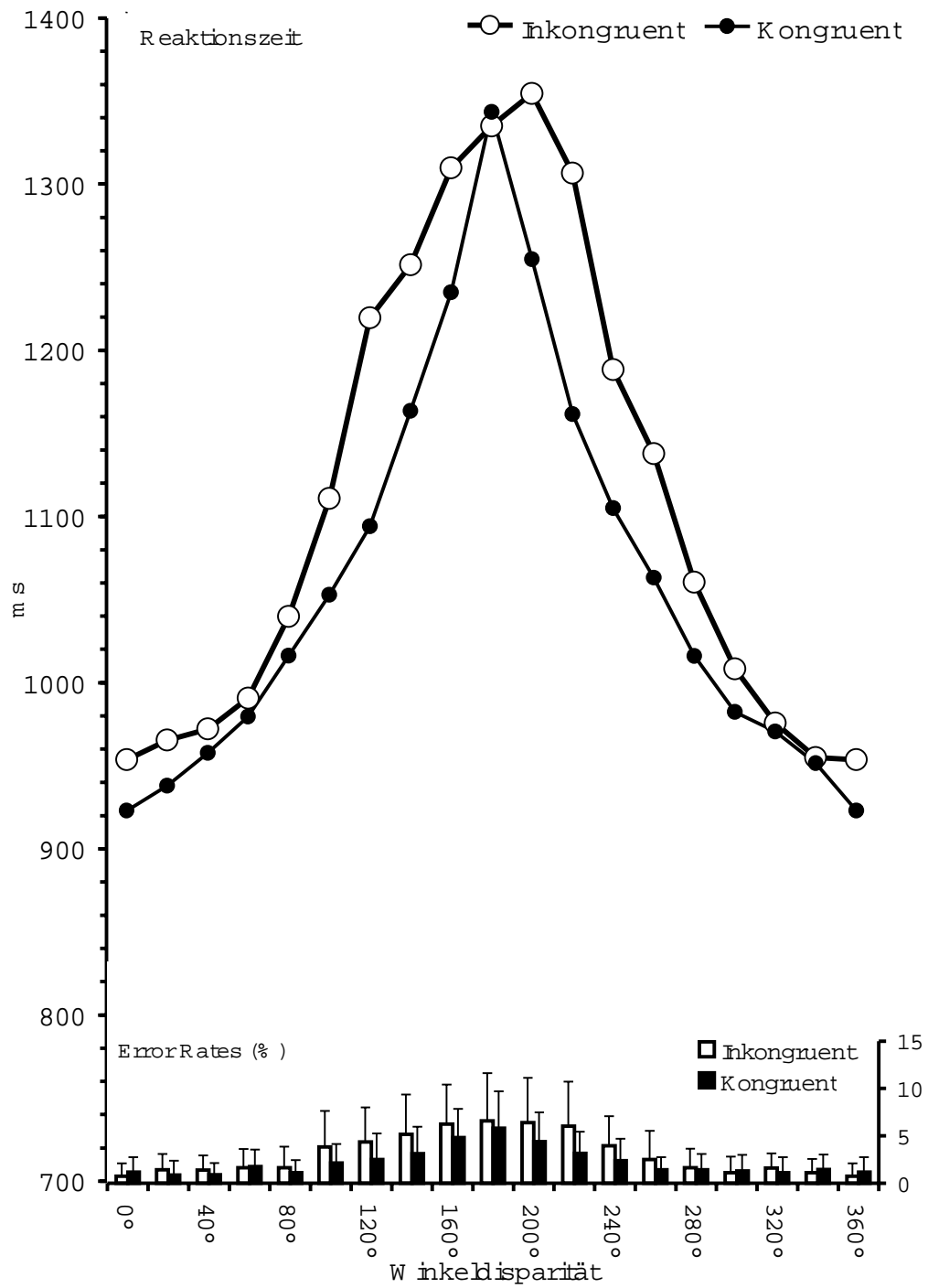


Abbildung 18: Experiment 3 - Mittlere Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der Kongruenz.

Die entsprechenden Daten finden sich in der nachfolgenden Tabelle 16.

Tabelle 17: Mittlere Reaktionszeiten getrennt für die Winkeldisparität und Kognruenz.

<i>Winkeldisparität</i>								
<i>Bedingung</i>	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°
<i>Kongruent</i>	639	640	653	668	688	736	776	837
<i>Inkongruent</i>	645	666	670	701	726	803	865	931

<i>Winkeldisparität</i>								
<i>Bedingung</i>	160°	180°	200°	220°	240°	260°	280°	300°
<i>Kongruent</i>	919	1044	922	849	773	735	692	667
<i>Inkongruent</i>	1014	1023	1043	971	895	809	741	706

<i>Winkeldisparität</i>		
<i>Bedingung</i>	320°	340°
<i>Kongruent</i>	659	638
<i>Inkongruent</i>	690	663

Unabhängig davon, ob die 0° und 180° Winkeldisparitäten in die Analyse einbezogen wurden, blieb dieses Befundmuster bestehen. In der nächsten Analyse wurden wieder die äquivalenten Winkelstrecken zusammengelegt. Hier zeigte sich abermals ein konsistentes Bild: Die Winkeldisparität ( $F(7, 329) = 269,86$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,46$ ) zeigte sich auch hier signifikant. Daneben blieb auch der Faktor Diskriminabilität bestehen ( $F(1, 47) = 14,87$ ;  $p < 0,0001$ ), sowie die Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen ( $F(1, 47) = 105,69$ ;  $p < 0,0001$ ). Es konnte weiterhin eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren Winkeldisparität x Kongruenz ( $F(7, 329) = 18,21$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\epsilon = 0,72$ ) beobachtet werden. Kein weitere signifikanter Einfluß der experimentellen Faktoren wurde sichtbar (siehe Abbildung )

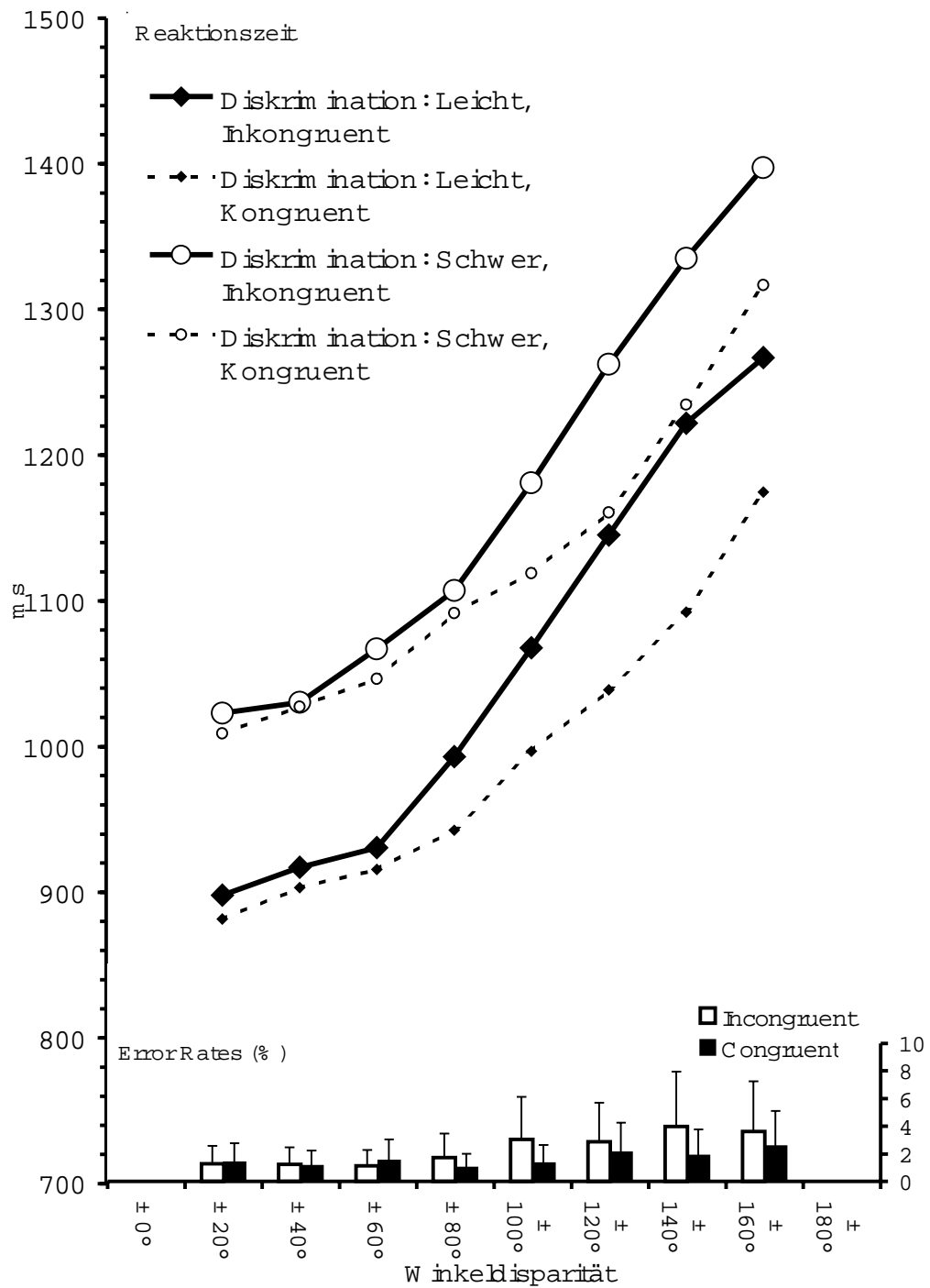


Abbildung 19: Experiment 3 - Darstellung der mittleren Reaktionszeiten als Funktion der drei realisierten experimentellen Faktoren: Winkeldisparität, Kongruenz und Diskriminabilität der Zielreize. Alle drei Hauptfaktoren wurden signifikant. Eine Interaktion fand sich jedoch für die beiden Faktoren Winkeldisparität und Kongruenz.

Die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeiten ergab auf der Basis, der oben gezeigten Daten, folgendes Bild. War die Diskriminabilität der beiden Reizpaare einfach, so rotierten die Versuchspersonen mit einer mittleren Geschwindigkeit von 48 ms/20° (bzw. 2,4 ms/1°) in der inkongruenten Bedingung. Waren die Bewegungsrichtungen hingegen kongruent so benötigten sie nur 36 ms/20° (bzw. 1,8 ms/1°). D.h. wir finden auch hier einen reliablen Einfluss der physikalischen Bewegung auf die mentale Rotation ( $F(1, 47) = 86,7; p < 0,0001$ ).

In der Bedingung, in der die beiden Reizpaare hingegen schwer voneinander zu unterscheiden waren („Diskrimination schwer“) finden wir einen ganz ähnlichen Einfluss der Bewegungskongruenz auf die Rotationsgeschwindigkeiten. Waren hier die beiden Bewegungsrichtungen inkongruent so benötigten die Versuchspersonen 50 ms/20° (bzw. 2,5 ms/1°). Bei einer kongruenten Richtung der beiden Bewegungen benötigen die Versuchspersonen dagegen 38 ms/20° (bzw. 1,9 ms/1°).

Ein Vergleich der Rotationsgeschwindigkeiten über die beiden Diskriminabilitäts-Bedingungen brachte keinen Unterschied: Die Rotationsgeschwindigkeit unter der Bedingung „Diskrimination: schwer“ unterscheidet sich nicht von der Rotationsgeschwindigkeit unter der Bedingung „Diskrimination: leicht“, wenn beide Bewegungsrichtungen identisch sind. Für den umgekehrten Fall, dass die Bewegungsrichtungen entgegengesetzt sind, finden wir ebenfalls keinen Unterschied.

### **3.3.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Mit dem vorliegendem Experiment sollte diejenige Stufe im Verarbeitungsprozeß der mentalen Rotation identifiziert werden, an der der Interferenzeffekt maßgeblich ansetzt. Hierzu wurde eine, der mentalen Rotation zeitlich vorgelagerte Stufe zusätzlich in das Paradigma aufgenommen: Der Zielreiz mußte zunächst *identifiziert* werden, bevor er rotiert werden konnte. Die Identifizierung war einfach, wenn ein zweite Reiz, dessen Auftretenshäufigkeit gleichwahrscheinlich war, dem dargebotenen Zielreiz unähnlich sah. Sie war auf der anderen Seite erschwert, wenn der Zielreiz aus einem Set entnommen war, bei dem

sich die beiden Zielreize aufgrund ihrer Form ähnlich sahen. Die Ähnlichkeit beruhte darauf, daß z.B. die Zahl 7, dem gespiegelten Buchstaben F recht ähnlich sah. Die Diskrimination der beiden möglich Zielreize mußte der mentalen Rotation vorangehen, da sonst die Paritätsentscheidung nicht korrekt ausfallen konnte. Die bereits berichteten Befunde zu Interferenzeffekt deuten darauf, daß damit die Geschwindigkeit der mentalen Rotation beeinflußt wird, nicht aber etwa eine frühere Stufe der Verarbeitung.

Die Ergebnisse aus Experiment 3 stützen diese Hypothese. Wir finden eine Interaktion der Faktoren Winkeldisparität mit der Bewegungsrichtung des Zielreizes, nicht jedoch eine Interaktion der Bewegungsrichtung mit der Diskriminierbarkeit der Reize. Die Interpretation der Befunde, daß eine Interaktion zweier experimenteller Faktoren als ein Hinweis genommen werden, daß diese Faktoren auf der gleichen Stufe der Verarbeitung ansetzen setzt jedoch voraus, daß alle drei Faktoren als Haupteffekte signifikant werden. Genau dies war auch der Fall: Neben der Diskrimination wurde erneut sowohl der Winkeleffekt als der Kongruenzeffekt signifikant.

#### 4. Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den kontinuierlichen *Bewegungscharakter* der mentalen Rotation mit Hilfe eines neuen Paradigmas nachzuweisen. Der Nachweis eines solchen Wirkprinzips würde eine zentrale Lücke im Verständnis der Verarbeitung von Informationen schließen helfen: Neben einem propositionalen Verarbeitungsmodus wäre damit ein zweiter, analoger Verarbeitungsmodus identifiziert, der im Falle der mentalen Rotation eine ganz *ähnliche* Dynamik hat, wie die reale physikalische Rotation eines Körpers. Diese Ähnlichkeit wird in der folgenden allgemeinen Hypothese explizit gemacht:

- *Am einem vorgestellten Objekt werden räumliche Transformationen (oder: Lageveränderungen) vorgenommen, indem (a) die räumlichen Eigenschaften des Objekts erhalten bleiben, und (b) die Transformationsschritte kontinuierlich ablaufen, ohne Zwischenpositionen zu überspringen.*

Bevor im weiteren Verlauf die Vorhersagen, die aus dieser allgemeinen Hypothese folgen, abgeleitet und im Kontext der empirischen Befunde diskutiert werden, soll zunächst einmal deutlich gemacht werden, warum es plausibel erscheint, die beiden Verarbeitungseigenschaften (a) und (b) für eine mentale Rotation anzunehmen. Eine Lageveränderung eines Objekts hat zum Ziel, die räumliche Position oder die Ausrichtung des Objekts zum Betrachter zu verändern, ohne daß die Eigenschaften des Objekt selbst verändert werden. Hieraus resultiert also eine umkehrbar eindeutige Abbildung einer Struktur auf eine andere (*primärer Isomorphismus*). Es ist jedoch zu fragen, weshalb diese Transformation kontinuierlich sein muß? Kosslyn (Kosslyn, 1980) vermutet in einer früheren Version seiner „*high-level vision*“-Theorie, daß die einzelnen Bestandteile eines vorgestellten Objekts separat transformiert werden. Da die Einzelteile dieses Objekts nicht explizit vorliegen, sondern aus der vorliegenden Repräsentation erst „herausgelöst“ werden müssen, was nicht fehlerfrei passiert, werden die Teilschritte einer mentalen Rotation immer wieder vor dem geistigen Auge sichtbar gemacht. Dieses inkrementelle Vorgehen verhindert also, daß einzelne Teile eines Objekts fehlerhaft rotiert werden und daß transformierte Objekt seine räum-

lichen Eigenschaften verändert. Dies aber impliziert, daß Objekte, die nur aus wenigen, oder gar nur aus einem Feature bestehen, nicht inkrementell transformiert werden - bzw. daß komplex aufgebaute Objekte sehr viel aufwendiger zu transformieren sind. Damit ließe sich vorhersagen, daß die Komplexität der zu transformierenden Objekte die mentale Rotationsgeschwindigkeit stark beeinflussen muß. Dies aber widerspricht Befunden, die aus Untersuchungen resultieren, die einfache Reize mit komplexen Reizen verglichen (z.B. (Bethell-Fox & Shepard, 1988b; Foerster, Gebhardt, Lindlar, Siemann, & et al., 1996; Shepard & Metzler, 1988)). Alle Befunde zeigen übereinstimmend, daß auch einfache Reize inkrementell rotiert werden und der Einfluß der Komplexität auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit sehr viel geringer ausfällt, als dies nach der obigen Überlegung der Fall sein müßte (siehe z.B. (Bethell-Fox & Shepard, 1988b; Foerster et al., 1996)). In einer aktuelleren Fassung seiner Theorie, diskutiert Kosslyn (Kosslyn, 1994) einen anderen Grund, für die schrittweise Transformation. Kosslyn (Kosslyn, 1994, p. 354):

*„An alternative account follows from the notion that motion-added image transformations rely on anticipated consequences of action. Because objects move through trajectories, we typically anticipate seeing them - and visualize seeing them - move in such a manner. And so, we transform objects in small increments.“*

D.h. die mentale Rotation eines Objekts vollzieht sich in der Weise, daß wir *Handlungskonsequenzen* antizipieren, und wir tun dies so, als ob wir das Objekt tatsächlich (physikalisch) rotieren würden: wir versetzen das vorgestellte Objekt in *Bewegung* (*motion-added transformation*). Aus dieser Betrachtung von Kosslyn (Kosslyn, 1994) folgt die Überlegung, daß die Kontinuitätsannahme zwei Eigenschaften besitzt: zum einen werden keine Orientierungsstufen übersprungen (Kontinuität), und zum anderen ist die *Bewegung des Objekts* eine weitere wesentliche Eigenschaft. Aus dieser Annahme, die mentale Rotation vollziehe sich so, indem ein vorgestelltes Objekt *kontinuierlich bewegt (rotiert)* wird, bis es eine terminale Orientierung erreicht hat, folgte die *Arbeitshypothese*. Hier wurde explizit auf die vorgestellte Bewegung eines Objekts Bezug genom-

men indem die Geschwindigkeit dieser Bewegung zum Untersuchungsgegenstand wurde:

- *Die Geschwindigkeit der mentalen Rotation ist von der Bewegungsrichtung des kreisförmig rotierenden Zielreizes abhängig. Stimmt die mentale Rotationsrichtung mit der Rotationsrichtung des Zielreizes überein (Kongruenz), so sollte die mentale Rotationsgeschwindigkeit höher sein, als wenn die beiden Bewegungsrichtungen inkongruent sind.*

Diese Arbeitshypothese wurde mit Hilfe eines Interferenzparadigmas untersucht. Den Versuchspersonen wurde hierzu ein Zielreiz präsentiert, der sich kreisförmig mit oder gegen den Uhrzeigersinn drehte - ohne seine lokale vertikale Orientierung zu ändern. Die Versuchspersonen sollten während dieser Zeit beurteilen, ob der Zielreiz normal oder gespiegelt dargestellt ist. Mit Hilfe dieser Versuchsanordnung sollte in allen Experimenten die zentrale Frage untersucht werden, ob sich die mentale Rotationsgeschwindigkeit mit der Rotationsrichtung des Zielreizes ändert.

#### **4.1 Teil 1: Entwicklung eines neuen Paradigmas**

Für die Beurteilung ob mit dem realisierten Paradigma eine Untersuchung der Frage möglich ist, wie sich die Bewegung eines Zielreizes auf die Geschwindigkeit der mentalen Rotation auswirkt, wurden im theoretischen Teil der Arbeit folgende Forderungen aufgestellt, die sich unmittelbar aus dem Bewegungsnacheffekt-Paradigma ergaben (S. 59-61):

- (1) Der Zielreiz sollte während seiner Bewegung seine lokale vertikale Orientierung nicht verändern.
- (2) Die sichtbare Kreisbewegung sollte für alle realisierten Winkelstufen gleich sein.
- (3) Die Bewegung sollte sich möglichst auf den Zielreiz beschränken und nicht die Peripherie oder den Hintergrund des Zielreizes betreffen.



- (4) Der Eindruck der Kreisbewegung sollte möglichst für alle Versuchspersonen gleich sein.

Diese Forderungen können aufgrund der verwendeten Versuchsanordnung sowohl für Experiment 1a als auch für Experiment 1b als erfüllt angesehen werden. Der Zielreiz führt eine gleichmäßige Kreisbewegung durch, dessen Rotationsrichtung mit jeder neuen Einzelaufgabe entweder mit oder gegen den Uhrzeigersinn sein kann. Dabei bleibt seine vertikale Orientierung unverändert. Leitgedanke des Paradigmas war es jedoch, die Geschwindigkeit der mentalen Rotation zu beeinflussen. Hierbei entsteht aber das Problem, mit welcher *Referenzbedingung* die beiden Kongruenzbedingungen verglichen werden sollen? Es ist ja denkbar, dass zwar die kongruente Bedingung eine höhere Rotationsgeschwindigkeit als die inkongruente Bedingung zur Folge hat, aber beide Geschwindigkeiten unter oder über einer möglichen Kontrollbedingungen liegen. Welche experimentelle Anordnung stellt aber eine „echte“ Kontrollbedingung zu einer Kreisbewegung dar? In persönlichen Gesprächen mit Asher Koriat (persönliches Gespräch, Mai 1997) und Andreas Wohlschläger (persönliches Gespräch, April 1998) wurde dieses Problem, welches bei diesem Paradigma zwangsläufig entsteht, diskutiert. Der Vergleich der beiden Kongruenzbedingungen mit einer Referenz- oder Kontrollbedingung kann nur dann „fair“ sein, wenn die Referenzbedingung eine, *und nur eine*, Eigenschaft der Kreisbewegung nicht enthält: nämlich die Kreisförmigkeit der Bewegung. Sie ist es, die der mentalen Rotation sehr ähnlich zu sein scheint. Der Vergleich mit einer linearen Bewegung erscheint somit wenig sinnvoll - darüber hinaus, konnte Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) zeigen, dass einer reine *Translation* nicht mit der mentalen Rotation interagiert. Der Vergleich mit einer Bedingung, in der der Zielreiz *statisch* dargeboten wird, erscheint ebenfalls keine „faire“ Bedingung zu sein, da ja hier der Reiz überhaupt keine Bewegung ausführt - und somit neben der Eigenschaft Bewegung auch die Eigenschaft „kreisförmig“ nicht besitzt. Somit wurden alle nachfolgenden - wie auch die vorliegende - Untersuchungen ohne eine solche Referenzbedingung realisiert.

### 4.1.1 Experiment 1a

**Der Winkeleffekt:** Ein deutlicher Winkeleffekt ist die Voraussetzung für die Beurteilung der Wirksamkeit des Paradigmas. Diese Voraussetzung kann, wie in der Abbildung 19 deutlich zu sehen, als erfüllt angesehen werden. D.h. sowohl die verwendeten Reize (F, L, R, P) als auch die realisierten Winkelstufen (0° bis 315° in 45°-Schritten) waren in der Lage einen mentalen Rotationseffekt auszulösen. Es findet sich ein relativ steiler Anstieg der Reaktionszeit von der 0° - Bedingung (800ms) bis zur 180°-Bedingung (1340 ms), der dann in gleichem Maße wieder abfällt. Dieses Befundmuster wird zusätzlich auch durch die Fehlerraten gestützt: je größer die Winkeldisparität des Zielobjekts zu seiner aufrechten Orientierung, desto mehr kommt zu Fehlentscheidungen. Der erhöhte Verarbeitungsaufwand drückt sich also neben der verlängerten Latenz auch in der Zahl der Fehlentscheidungen aus. Diese Befundmuster rechtfertigen die Aussage, daß mit Zunahme der Winkeldisparität auch eine Zunahme der Reaktionszeit zu beobachten ist - und sich somit zunächst einmal also eine mentale Rotation in den Ergebnissen widerspiegelt.

**Der Kongruenzeffekt:** Wir finden neben dem Winkeleffekt auch einen deutlichen Effekt der *Kongruenz* der beiden Rotationsrichtungen. Waren die beiden Bewegungsrichtungen (mental wie physikalisch) kongruent zueinander, so reagierten die Versuchspersonen schneller als wenn die beiden Richtungen inkongruent zueinander waren. D.h. wir finden in dem realisierten Paradigma Bedingungen vor, die zum einen den mentalen Rotationsprozess *unterstützen* bzw. im inkongruenten Fall, sich eher *behindernd* hinsichtlich der Verarbeitungsgeschwindigkeit auswirken. Die Wahrnehmung eines rotierenden Zielreizes während der mentalen Rotation desselben Reizes, wirkt sich also auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit aus. Anders als bei Heil et al. (Heil et al., 1997) oder Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982), wo die Versuchspersonen den Eindruck einer paradoxen Kippung des Zielreizes, während der mentalen Rotation berichten, sehen sie in dem verwendeten Paradigma nur einen kreisenden Zielreiz. Diese Wahrnehmung scheint also im weiteren Verlauf der visuellen

Verarbeitung dieses Reizes mit der mentalen Rotation zu interferieren. Diese Interpretation wird auch weiterhin durch die sehr aufschlußreiche Wechselwirkung der Winkeldisparität mit der Bewegungsrichtung des Zielreizes, gestützt. Hier zeigte sich, daß mit der Zunahme der Winkeldisparität auch die beschleunigende bzw. verzögernde Wirkung auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit zunahm. Je größer die Winkeldisparität, desto größer der Einfluß, der von der Bewegung des Zielreizes ausging, auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit. Dieser Effekt der Verzögerung/Beschleunigung trat unabhängig davon auf, ob die Minima (0°) und Maxima (180°) selbst in die Analyse einbezogen wurden. Die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeiten ergab ein ebensolches Bild: Es fanden sich signifikant niedrigere Geschwindigkeiten für diejenige Bedingung, bei der davon auszugehen ist, daß die mentale Rotation und die Umlaufrichtung des Zielreizes in unterschiedliche Richtungen verlaufen (4,07 °/ms vs. 2,7°/ms;  $F(1, 20) = 27,43$ ;  $p < 0,0001$ )).

Welche Hinweise auf die Arbeitsweise der mentalen Rotation können aus einer solchen Interferenz abgeleitet werden? Für die Beantwortung dieser Frage, ist es zunächst einmal notwendig, die Stufe, auf der die mentale Rotation innerhalb der Verarbeitungskette ansetzt, näher einzukreisen. Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) taten dies, indem sie die mentale Rotation mit anderen Faktoren kombinierten, von denen angenommen werden kann, daß sie auf einer sehr frühen Stufe der visuellen Verarbeitung ansetzen. In einem ersten Experiment ließen sie hierzu den Hintergrund rotieren, während der Zielreiz statisch auf dem Bildschirm präsentiert wurde. Der Hintergrund des Zielreizes (ein Graumuster) konnte dabei mit- oder gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Wenn sich nun die mentale Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rotationsrichtung des Hintergrunds ändern sollte, dann wäre dies ein Hinweis darauf, daß die mentale Rotation auf der selben *frühen* Stufe operiert, wie die rotationssensitiven Rezeptoren {Hubel, 1962 #112; (Hubel & Wiesel, 1968)}. Aufgrund des Ausbleibens einer Interaktion der Hintergrundbewegung mit der mentalen Rotation schlossen Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992), daß die mentale Rotation auf einer späteren Stufe der visuellen Verarbeitung ansetzen muß. Weitere Experimente stützten diese Interpretation: Die mentale Rotation blieb un-

beeinflusst davon, ob die Zielreize durch die ihre Textur, Farbe, Kontrast oder binokulare Disparität definiert waren - alle diese Faktoren waren nicht in der Lage, die mentale Rotationsgeschwindigkeit zu beeinflussen. Wurde hingegen die vertikale Orientierung des Zielreizes während der Präsentation leicht geändert - was von der Versuchsperson als *Bewegung* des Zielreizes wahrgenommen wurde, so beschleunigte sich die mentale Rotationsgeschwindigkeit wenn die Änderung in die gleiche Richtung verlief, wie die mentale Rotation. Verlief die Bewegung des Zielreizes hingegen in die gegenläufige Richtung, so kam es zu einer Verzögerung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit. An dieser Stelle sei noch einmal auf das unterschiedliche Vorgehen von Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) und den hier berichteten Experimenten explizit eingegangen. Die Beeinflussung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit wurde bei Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) dadurch möglich, indem der Zielreiz selbst seine vertikale Orientierung während der mentalen Rotation veränderte. Er wurde in schneller Abfolge jeweils um  $10^\circ$  rotiert von seiner Ausgangsorientierung dargeboten. Dabei schien er von z.B.  $45^\circ$  auf  $55^\circ$  zu kippen - dies wurde von den Versuchspersonen als *Bewegung* wahrgenommen. D.h. die Interaktion der physikalischen Rotationsrichtung des Zielreizes mit der mentalen Rotation wurde dadurch erreicht, indem der zu rotierende Reiz selbst rotiert. Bei den hier diskutierten Experimenten veränderte der Zielreiz seine lokale, vertikale Orientierung niemals. Der Zielreiz hatte zu jedem Zeitpunkt der Präsentation eine eindeutige, sich nicht verändernde Orientierung. Die Interpretation der Befunde von Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) ist m.E. aber aufgrund der Veränderung der Orientierung des Zielreizes problematisch. Es ließe sich vielmehr auch so argumentieren, daß bei einer kongruenten Drehbewegung des Zielreizes, der Versuchsperson nicht ein Zielreiz in z.B.  $45^\circ$  - Orientierung präsentiert wurde, sondern in  $35^\circ$ , da der Zielreiz die  $10^\circ$ -Kippung gegen den Uhrzeigersinn ausführt. Die Ausrichtung des Zielreizes *nach* vollführter Drehbewegung wäre dann der Input für die mentale Rotation. D.h. in der kongruenten Bedingung wurden somit die Zielreize jeweils um  $10^\circ$  weniger rotiert, als in der inkongruenten Bedingung. Somit entsteht der Eindruck, die kongruente Bedin-

gung führt zu einer Beschleunigung und die inkongruente Bedingung zu einer Verzögerung der mentalen Rotation.

Mit diesem zuletzt berichteten Experiment replizierten Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) die Interferenzergebnisse von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982). Damit ist war ein Hinweis auf die Verarbeitungsstufe der mentalen Rotation gegeben: Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die mentale Rotation auf einer Stufe erfolgt, *nachdem* elementare Eigenschaften des Zielreizes, wie z.B. Bewegung, Farbe, Textur o.ä. bereits analysiert sind. Die im Experiment 1a beobachtete Interferenz zwischen der Kreisbewegung des Zielreizes und der mentale Rotationsgeschwindigkeit kommen demnach nicht dadurch zustande, daß rotationssensitive Rezeptoren die Bewegungsrichtung des Zielreizes analysieren und damit evtl. nicht mehr für die mentale Rotation zur Verfügung stehen. Vielmehr legen diese Ergebnisse den Schluß nahe, daß die nachgestellte, höhere Analyse der *Kreisbewegung* des Zielreizes mit der gleichzeitig aktiven mentalen Rotation interferiert.

Die Ergebnisse des ersten Experiments lassen sich in folgender Weise zusammenfassen: Die Kreisbewegung des Zielreizes war in der Lage neben einem deutlichen Winkeleffekt auch eine deutliche Modulation der mentalen Rotationsgeschwindigkeit zu verursachen. Dieser Interferenzeffekt kann als eine Replikation der Befunde von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982) und von Heil et al. (Heil et al., 1995) angesehen werden, der sich aber durch das neue Paradigma eindeutiger auf die *Bewegung* des Zielreizes zurückführen läßt.

Im Unterschied zu den beiden in der Literatur berichteten Untersuchungen (Corballis & McLaren, 1982; Heil et al., 1997) fanden wir in dieser Untersuchung aber keinen Hinweis auf eine Verschiebung des Maximums. Eine solche Verschiebung hätte als Hinweis angesehen werden können, daß die Bewegungsrichtung des Zielreizes die Versuchspersonen dazu verleitet, in die selbe Richtung zu rotieren - was dazu geführt hätte, daß die Versuchspersonen über 180° rotieren. Aufgrund der relativ großen Winkelabstände von jeweils 45° ist dies aber mittels dieser Versuchsanordnung nicht auszuschließen, da eine mögliche Maximum-Verschiebung aufgrund der wenigen Stützstellen möglicherweise un-

entdeckt geblieben ist. Im nachfolgendem Experiment wurde deswegen die Zahl der realisierten Winkeldisparitätsstufen auf 18 erhöht.

#### 4.1.2 Experiment 1b

**Der Winkeleffekt:** Ziel des zweiten Experiments war es, den Interferenzeffekt, der im ersten Experiment berichtet wurde, zu replizieren. Hierzu wurde die Anzahl der Winkelstufen erhöht - was bei einer gleichbleibenden Anzahl von Trials pro Bedingung zu einer Erhöhung der Gesamtzahl aller Trials führte. Die Versuchspersonen bearbeiteten nun insgesamt 2304 Trials. Auch hier konnten wir einen deutlichen Winkeleffekt beobachten: mit der zunehmenden Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner Normalausrichtung stieg die Reaktionszeit an und erreicht bei 180° das Maximum (in der inkongruenten Bedingung wurde dieses Maximum bei 200° erreicht - siehe hierzu später). Insgesamt aber scheinen die Reaktionszeiten im Gegensatz zum ersten Experiment beschleunigt zu sein: Die 0°-Bedingung startet bei ca. 650ms (Experiment 1a: 805 ms) und erreicht bei 180° ca. 1040ms (Experiment 1a: ca. 1500 ms). Als Geschwindigkeitsmaß ausgedrückt heißt das, dass im Experiment 1a die Versuchspersonen mit 3,3ms/1° reagierten, wo hingegen im zweiten Experiment lediglich 2,25ms pro Grad Rotation benötigt wurden. Dieser unterschiedliche Verlauf der Reaktionszeiten führte zunächst zu der Hypothese, dass es aufgrund der Verdoppelung der Trials zu Übungseffekten gekommen sein konnte, die als Ursache für diese Beschleunigung angesehen werden könnten. Was aber wird geübt, wenn die Anzahl der Rotationsaufgaben erhöht wird? Hierzu wurden in der Literatur verschiedene Vorschläge gemacht. Grundsätzlich lassen sich hierbei zwei verschiedene Ansätze unterscheiden (siehe hierzu (Newell & Rosenbloom, 1981)). Die erste Klasse von Erklärungen hebt auf die einer Aufgabe zugrundeliegenden Algorithmen oder Subroutinen ab - sie deswegen auch *Prozess-basiert* genannt. Diese Ansätze gehen davon aus, dass redundante und ineffektive Prozessschritte mit zunehmender Übung immer mehr durch effektivere und schnellere Algorithmen ersetzt werden, die zu größeren Einheiten zusammengefasst werden (z.B. (Neves & Anderson, 1981)). Aus dieser Perspektive lassen sich Trainingseffekte darauf zu-

rückführen, dass die Prozesse selbst effizienter werden und die wiederholte Ausführung einer Aufgabe zu einer Steigerung der Ausführungsgeschwindigkeit führt. Eine gänzlich andere Klasse von Ansätzen zur Erklärung von Trainingseffekten bei kognitiven Aufgaben, gehen davon aus, dass sich der zugrundeliegende Lösungsmechanismus ändert - sog. *Instanzen-basierte* Theorien. Werden in der Anfangsphase, in der noch alle Aufgaben eines Typs neu sind, Algorithmen angewendet, die für die Lösung notwendig sind, so kommt es mit zunehmender Übung immer häufiger dazu, dass ganze Lösungsschritte aus dem Gedächtnis abgerufen werden. D.h. zu Anfang der Übung noch explizit ausgeführte Teilschritte können zum Ende hin immer häufiger komplett aus dem Gedächtnis abgerufen - der erzielte Verbesserung in der Performanz beruht somit nicht auf einer Verbesserung der verwendeten Algorithmen, sondern auf einen effizienteren Zugriff auf die im Gedächtnis vorliegenden Teillösungen vorangegangener Aufgaben (siehe hierzu z.B. (Logan, 1988)). Für die mentale Rotation wurden Trainingseffekte festgestellt. Interessanterweise führte die steigenden Anzahl von Aufgaben neben einem generellen Absinken der Reaktionszeit auch zu einer deutlichen Steigerung der *Rotationsgeschwindigkeit*: Der Anstieg der Reaktionszeitkurve verflachte mit zunehmender Übung - der Winkeleffekt wurde also kleiner (z.B. (Bethell-Fox & Shepard, 1988a; Kail & Park, 1990; Wallace & Hofelich, 1992)) und die geforderte mentale Operation konnte schneller erfolgen. Für diesen Effekt wurden verschiedene Erklärungen angeboten. Wallace und Hofelich (Wallace & Hofelich, 1992) vertreten eine Prozess-basierte Hypothese, die besagt, dass mit zunehmender Übung zum einen der Prozess der mentalen Rotation effizienter ausgeführt wird und zum anderen ein Transfer des Übungseffekts zu anderen, ähnlichen visuell-geometrischen Aufgaben stattfinden sollte, da solche Aufgaben zum Teil von den gleichen Prozeduren ausgeführt werden (siehe hierzu den „find-proces“ von Kosslyn (Kosslyn, 1983)). Bethell-Fox und Shepard (Bethell-Fox & Shepard, 1988a) hingegen befürworten eine andere Prozess-basierte Erklärung der berichteten Übungseffekte auf die mentale Rotation, die davon ausgeht, dass neue Reize zunächst in Teilen rotiert werden (Kosslyn, 1980) und mit zunehmender Übung die Reize als Ganzes rotiert werden. D.h. hier führt ein Training eher dazu, dass die verwendete Lösungsstrategie von „analytisch“

zu „holistisch“ wechselt . Implizit ist damit ausgedrückt, dass sich bei der Vorlage neuer, nie zuvor mental rotierter Reize, wenig oder kaum Transfereffekte einstellen sollten.

Abschließend wurde auch von Tarr und Pinker (Tarr & Pinker, 1989) eine Erklärung vorgeschlagen, die als Instanz-basiert angesehen werden kann. Hier geht man nicht davon aus, dass die verwendeten Algorithmen, die für eine mentale Rotation nötig sind, eine Effektivitätssteigerung erfahren (Wallace & Hofelich, 1992) oder die Strategie von einer partieller Rotation zu einer holistischen wechselt (Bethell-Fox & Shepard, 1988b), sondern, dass mit zunehmender Übung immer mehr Repräsentationen der Zielreize (samt ihren verschiedenen Orientierungen) im Gedächtnis abgelegt werden und bei einer erneuten Vorlage abgerufen werden. D.h. je mehr Trials mit relativ wenigen Reizen „trainiert“ werden, desto kleiner sollte der Anstieg der Reaktionszeitkurve sein, da die Versuchspersonen immer häufiger auf „Instanzen“ der zuvor rotierten Reize zugreifen können. Hier kann es also kaum Transfereffekte auf neu vorgelegte Reize geben, da diese noch keine „Instanzen“ gebildet haben können.

Heil, Rösler, Link und Bajric (Heil, Rösler, Link, & Bajric, 1998) versuchten zwischen diesen drei Hypothesen in einer eigenen Untersuchung zu entscheiden. In dieser Untersuchung nahmen die Versuchspersonen an drei Sitzungen teil, in denen ihnen Würfelfiguren, wie sie von Shepard und Metzler (Shepard & Metzler, 1971) verwandt wurden, zur Paritätsbeurteilung vorgelegt wurden. Die Experimentalgruppe erfuhr dabei in vier zusätzlichen Sitzungen ein Training, in welchem ihnen eine Teilmenge der in der späteren Testsitzung vorgelegten Würfelfiguren in verschiedenen Perspektiven dargeboten wurde. Hierbei zeigte sich, dass die Experimentalgruppe spezifische Lerneffekte zeigte, die dazu führten, dass bereits bekannte Objekte mit der Zeit immer schneller rotiert wurden. Jedoch, zeigten sich keinerlei Hinweise darauf, dass ein Transfer der Trainingseffekte auf bekannte Objekte in neuen Orientierungen bzw. auf gänzlich neue Objekte stattfand. D.h. Reize, die vorher nicht explizit trainiert wurden, wurden nicht schneller rotiert, als vor dem Training. Damit, so Heil et al., scheint die von Tarr und Pinker (Tarr & Pinker, 1989) vorgeschlagene Erklärung der Trainingseffekte starke Unterstützung zu erhalten. Der bei der mentalen Ro-



tation eingesetzte Algorithmus scheint mit zunehmendem Training immer häufiger durch den Abruf im Gedächtnis gehaltener Repräsentationen der spezifischen Reize ersetzt zu werden.

Für die hier vorfolgte Frage, ob die im Experiment 1b beobachtete generelle Beschleunigung der Reaktionszeiten gegenüber dem ersten Experiment, auf den von Heil et al. beobachteten Trainingseffekt zurückzuführen ist, wurden die Daten des zweiten Experiments in zwei Hälften geteilt, indem die ersten 1152 Trials mit den Trials 1153 bis 2304 verglichen wurden<sup>10</sup>. Wenn die Verdoppelung der Aufgaben zu einem Übungseffekt geführt haben sollte, so müsste sich bei der Betrachtung der Daten aus der ersten Hälfte dieses Experiments ein ähnlicher (absoluter) Reaktionszeitverlauf zeigen, wie er im Experiment 1a beobachtet werden konnte. Die zweite Hälfte hingegen sollte neben einer generellen Verkürzung der Reaktionszeit auch einen weniger starken Anstieg zeigen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der Kongruenzbedingung getrennt für die beiden Hälften im Experiment 1b.

---

<sup>10</sup> Diese Teilung konnte anhand der Triahummener erfolgen, da die Zufallsverteilung aller Ereignisgruppen über das Experiment keine Einschränkungen unterlag.

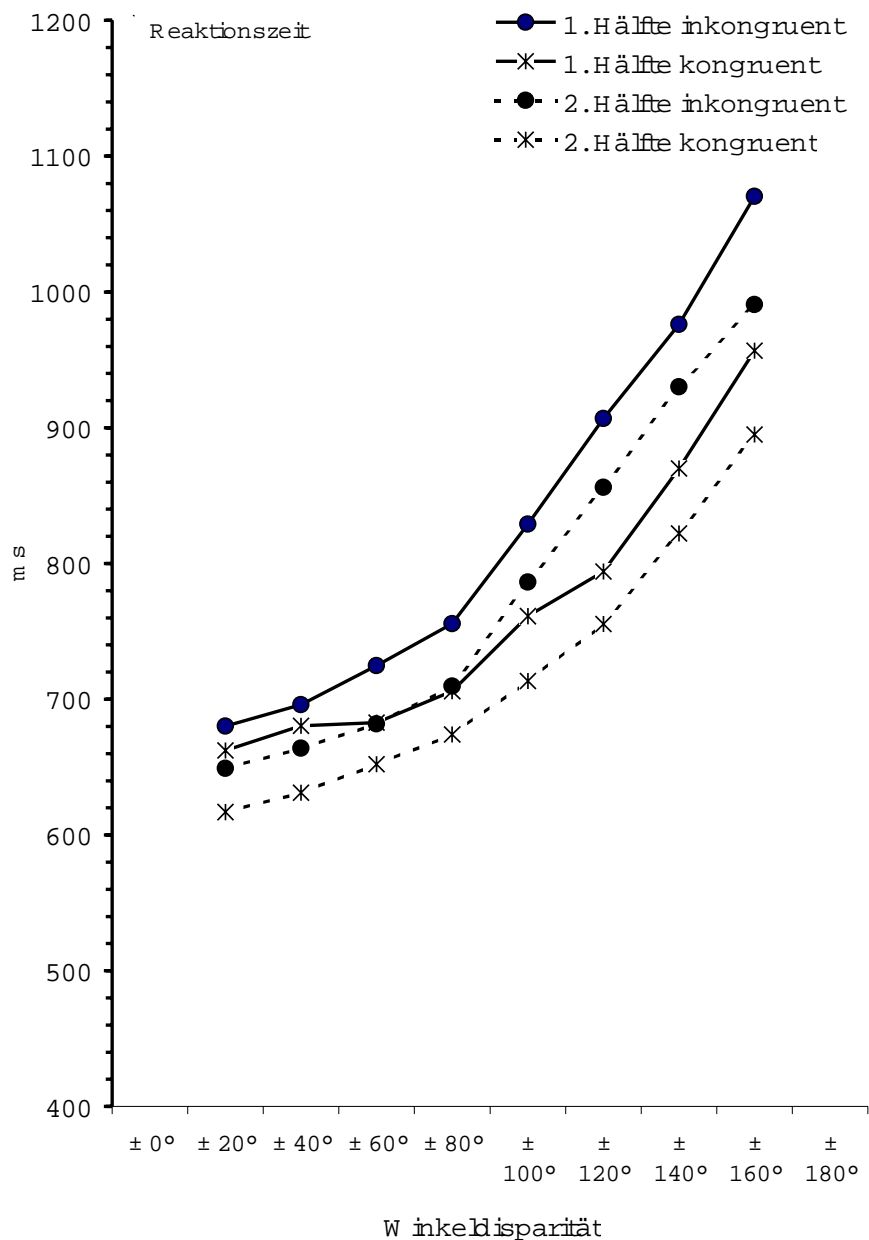


Abbildung 20: Experiment 1b: Die Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität und der Kongruenz-Bedingung getrennt für die erste und zweite Hälfte des Experiments.

Die Analyse der so geteilten Daten erbrachte neben dem Haupteffekt „Hälfte“ ( $F = (1, 32) = 11.53; p < 0.0018$ ), eine signifikante Wechselwirkung der beiden Faktoren „Hälfte“ vs. „Winkeldisparität“ ( $F = (7, 224) = 2.93; p < 0.005$ ). Eine Interaktion mit dem Faktor „Kongruenz“ zeigte sich darüber hinaus nicht. Dieses Befundmuster spricht zunächst dafür, dass in der ersten Hälfte des Experiments signifikant höhere Latenzen zu beobachten sind, als in der nachfolgenden Hälfte des Experiments (siehe hierzu Tabelle 17). D.h. im Mittel (über alle

experimental Faktoren gemittelt) reagierten die Versuchspersonen in der ersten Hälfte des Experiments mit einer Latenz von 796 ms im Gegensatz zur zweiten Hälfte, bei der sie im Mittel mit einer Latenz von 751 ms reagierten. Ein Vergleich der Steigung der so gebildeten ersten vs. zweiten Hälfte ergab keinen signifikanten Unterschied ( $F(1,32) = 1,33$ ;  $p < 0,23$ ;  $\epsilon = 0,25$ ).

Tabelle 18: Experiment 1b - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) als Funktion der Winkeldisparität und der Kongruenz-Bedingung getrennt für die erste und zweite Hälfte des Experiments.

Bedingung	Winkeldisparität							
	$\pm 20^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 80^\circ$	$\pm 100^\circ$	$\pm 120^\circ$	$\pm 140^\circ$	$\pm 160^\circ$
1. Hälfte inkongruent	662	680	682	705	761	794	870	956
1. Hälfte kongruent	680	696	724	755	828	906	976	1070
2. Hälfte inkongruent	616	631	652	673	713	755	822	895
2. Hälfte kongruent	649	663	681	709	786	856	930	990

Im Vergleich hierzu, die Daten aus dem Experiment 1a (nicht nach Hälften getrennt):

Tabelle 19: Experiment 1a - Mittlere Reaktionszeiten (in ms) für „Kongruenz“ und „Winkeldisparität“.

Bedingung	Winkeldisparität							
	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$	$215^\circ$	$270^\circ$	$315^\circ$
Kongruent	802	836	919	1103	1314	1066	917	842
Inkongruent	810	888	1053	1250	1347	1255	1037	880

Wir finden im Experiment 1b also einen Hinweis auf einen Trainingseffekt, der dazu geführt hat, dass die Versuchspersonen im Laufe des Experiments die verschiedenen Repräsentationen der Reizes (und ihrer Orientierungen) „lernten“ und vermutlich für die Lösung der Paritätsaufgabe nutzten (siehe hierzu Tarr & Pinker, 1989). Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Reaktionszeitdifferenz zwischen der mittleren Reaktionszeit im ersten Experiment (1003 ms; gemittelt über alle experimental Faktoren ohne die  $0^\circ$  und  $180^\circ$  - Bedingung) und der ersten Hälfte im Experiment 1b (796 ms) mit diesem „Trainingseffekt“ kaum erklärt werden kann. Vielmehr reagieren die Versuchspersonen schon von An-

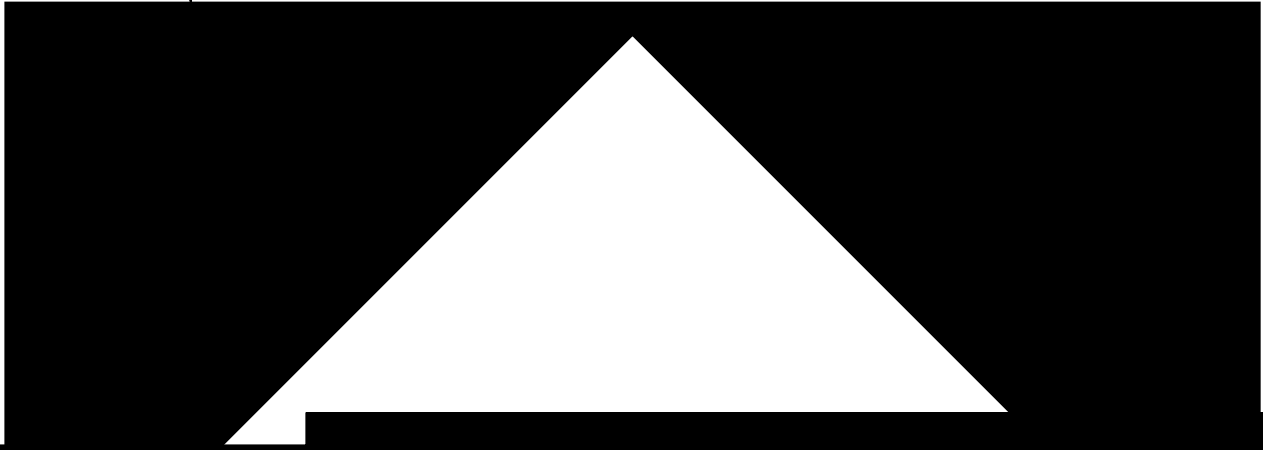
fang an mit einer um ca. 200 ms *kürzeren* Latenz als im Experiment 1a. Gegen einen Trainingseffekt, der durch die Länge des Experiments hätte vermutet werden können, spricht auch der nicht vorhandene Unterschied der ermittelten Steigungen für die ersten vs. zweite Hälfte: In der zweiten Hälfte des Experiments 1b rotieren die Versuchspersonen nicht schneller, als in der ersten Hälfte - im Gegensatz zu den berichteten Befunden von (Bethell-Fox & Shepard, 1988a; Kail & Park, 1990; Wallace & Hofelich, 1992). Dieser empirische Befund muss an dieser Stelle unerklärt bleiben bzw. die Gründe für diese Differenz in z.B. der zufälligen Zusammensetzung der Stichprobe vermutet werden.

Für die in dieser Analyse beobachtete Wechselwirkung der beiden Faktoren „Hälfte“ vs. „Winkeldisparität“ schlagen Heil et al. (Heil et al., 1998) eine Ergänzung der von Tarr und Pinker (Tarr & Pinker, 1989) entwickelten Instanzbasierten Hypothese des Übungseffekts vor. Hiernach könnte es so sein, dass eine Repräsentation eines bestimmten Reizes einfacher - oder früher während der Trainingsphase - gebildet werden kann, wenn die Winkeldisparität des dargebotenen Reizes klein ist. D.h. je weiter der Reiz von seiner normalen, im Langzeit-speicher befindlichen aufrechten Orientierung entfernt ist, desto schlechter, oder langsamer kann eine „orientierungsfreie“ Repräsentation gebildet werden. Diese Spekulation könnte die erwähnte Interaktion der beiden experimental Faktoren erklären, wonach der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Hälfte des Experiments mit zunehmender Winkeldisparität kleiner wird.

Ein weiteres Ziel des Experiments 1b war es, die im Experiments 1a nicht beobachtete Verschiebung des Maximums der Reaktionszeit-Winkelfunktion mit Hilfe einer feineren Auflösung der Stützstellen näher zu untersuchen. Die in der Literatur berichtete (Corballis & McLaren, 1982; Heil et al., 1995) Verschiebung des maximalen Zeitverbrauchs, der in einem Standard Paradigma (z.B. Shepard & Metzler, 1971) bei einer Winkeldisparität von 180° zu beobachten ist, konnte in dem Experiment 1b nur unter einer Bedingung beobachtet werden. In der nächsten Abbildung ist dieser Effekt noch einmal dargestellt, die Reaktionszeit ist hier aber nicht nach den beiden Kongruenzbedingungen getrennt dargestellt, sondern als Funktion der Bewegungsrichtung (mit und gegen den Uhrzeigersinn) des Zielreizes.



1,



tion zu  
geg  
.eis



L zu

180° ist die kürzeste Winkelstrecke jedoch mit dem Uhrzeigersinn, hier ist die Bewegungsrichtung des Zielreizes also kongruent zur mentalen Rotationsrichtung - eine positive Interferenz kann aufgrund der kürzeren Latenzen gefolgert werden. Ein wenig anders stellt sich dieser Sachverhalt aber in der Bedingung „gegen den Uhrzeigersinn“ dar. Bis zur einer Disparität von 180° zeigen sich in dieser Bedingung kürzere Latenzen - was darauf hindeutet, dass in dieser Bedingung links vom Maximum die positive Interferenz der „richtigen“ Bewegungsrichtung des Zielreizes zu sehen ist. Da das Maximum erst bei 200° erreicht wird, deutet dies daraufhin, dass diese mentale Rotationsrichtung (gegen den Uhrzeigersinn) sowohl für 180°- als auch für die 200°-Bedingung *beibehalten* wird. Die Versuchspersonen behalten also die mentale Rotationsrichtung bei und rotieren somit über eine Winkelstrecke von 180° hinaus - obwohl Umkehrung der mentalen Rotationsrichtung bei 200° die kürzere Winkelstrecke bedeuten würde. Da die verschiedenen experimentellen Bedingungen (Winkeldisparität, Drehrichtung und die Parität des Zielreizes) für jeden Trial zufällig bestimmt wurden, kann es sich hier nicht etwa um einen Gewöhnungseffekt handeln. Diese asymmetrische Maximumverschiebung, also zu Gunsten einer mentalen Rotationsrichtung unter der Bedingung, dass sich der Zielreiz gegen den Uhrzeigersinn dreht, scheint aber so etwas wie eine *bevorzugte* Strategie in diesem Experiment gefördert zu haben. Diese Erklärung deckt sich mit einem Teil der von Heil et al. (Heil et al., 1997) untersuchten Hypothesen über die Wirkung des Bewegungsnacheffekts auf die mentale Rotation. Dort wird u.a. die sog. *strategische* Hypothese als Ursache für die Beschleunigung/Verzögerung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit unter dem Einfluss des Bewegungsnacheffekts diskutiert. Diese Hypothese besagt, dass die Rotationsgeschwindigkeit unter dem Einfluss des Nacheffekts gar nicht verändert wird, stattdessen hat der Bewegungsnacheffekt zur Folge, die Wahl der mentalen Rotationsrichtung zu beeinflussen: Die Wahl wird demnach nicht aufgrund der kürzeren Winkelstrecke getroffen, vielmehr „verleitet“ die Richtung des Nacheffekts in dieselbe Richtung zu rotieren. Die Wahl für eine bestimmte Rotationsrichtung stellt demnach eine Wahrscheinlichkeitsfunktion dar, die von der Orientierung des Zielreizes abhängt und der Richtung des Nacheffekts. Hiernach wird ein z.B. um 120° gedrehter Zielreiz mit ei-

ner Wahrscheinlichkeit  $p$  in Richtung des mit dem Uhrzeigersinn wirkenden Nacheffekts gedreht, und mit der Gegenwahrscheinlichkeit  $1-p$  um  $120^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn gedreht - also die kürzere Winkelstrecke. Die Wirkung des Nacheffekts würde sich damit auf die Beeinflussung dieser Wahrscheinlichkeit  $p$  beschränken, und somit auf die Wahl der Lösungsstrategie. Hier drückt sich aber zweifellos eine symmetrische Wirkweise des Nacheffekts aus: Die Beeinflussung der Wahrscheinlichkeit für die Wahl einer bestimmten Rotationsrichtung sollte unter beiden Rotationsrichtung (mit oder gegen den Uhrzeigersinn) nicht unterschiedlich sein. Diese Erklärungsmöglichkeit scheidet also aufgrund der vorliegenden asymmetrischen Verschiebung des Maximums aus. Der Anteil derjenigen Versuchspersonen, auf die die Maximumverschiebung zurückgeht, beträgt 57%. Bei dieser Teilmenge der Gesamtstichprobe beträgt die Differenz der mittleren Reaktionszeit der  $200^\circ$ -Bedingung zur  $180^\circ$  ca. 80ms. Da in der Literatur keine solche „Vorliebe“ für eine bestimmte Rotationsrichtung berichtet wird, muss die Ursache für diesen Effekt unerklärt bleiben, bzw. in der Stichprobenszusammensetzung vermutet werden.

**Der Kongruenzeffekt:** Neben dem Winkelleffekt fanden wir auch in diesem Experiment einen deutlichen Kongruenzeffekt. Erneut reagierten die Versuchspersonen langsamer, wenn der Zielreiz sich in die entgegengesetzte Richtung vor ihren Augen drehte, als sie ihn mental zu drehen suchten. Umgekehrt zeigten sie eine schnellere Reaktion, wenn der Zielreiz die gleiche Bewegungsrichtung ausführte, wie die innere mentale Rotation. Neben einer generell erhöhten Reaktionszeit im Vergleich zu dem Experiment 1a (siehe vorangehende Diskussion) finden wir in dieser Untersuchung auch einen nichtlinearen Trend in Daten. Der in der Literatur (z.B. Shepard & Metzler, 1971) häufig berichtete lineare Verlauf der Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Winkeldisparität, setzt hier erst ab einer Winkeldisparität von  $80^\circ$  ein. Kleinere Winkeldisparitäten ( $<80^\circ$ ) gehen hier mit einer sehr viel kleineren - oder gar keinen Steigung einher. Dies kann als ein Hinweis darauf gedeutet werden, dass alphanumerische Zeichen hoch-überlernte Reize darstellen, die im Verlauf des Lernprozesses zu einer

annähernd „orientierungsfreien“ Repräsentation (d.h. inklusive kleinerer Abweichungen) geführt haben.

Wie aber ist nun die erneut beobachtete Interferenz der beiden Bewegungsrichtungen zu interpretieren? Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) vertreten die Ansicht, dass die Interaktion des Bewegungsnacheffekts mit der mentalen Rotation darauf hindeutet, dass die visuelle Wahrnehmung und die visuelle Vorstellung durch ein und das selbe Modul bereitgestellt wird. Aus einer prozeduralen Perspektive (die neuronale Sichtweise wird später diskutiert werden), bedeutet dies, dass die Identifizierung einer Kreisbewegung durch die selbe Prozedur geleistet wird, wie sie bei der mentalen Rotation zum Einsatz kommt. Bestimmte Eigenschaften dieser Prozedur wurden aus der Untersuchung von Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992) deutlich, indem sie zeigen konnten, dass es sich hierbei um eine abstrakte, relativ späte Verarbeitungsstufe im visuellen System handeln muss. Eine weitere starke Evidenz dafür, dass es sich hier um eine *high-level* Prozedur handeln muss, zeigen die Arbeiten von Wohlschläger (Wohlschläger, submitted-a; Wohlschläger, submitted-b; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) präsentierte seinen Versuchspersonen dreidimensionale Reize vom Typ Shepard-Metzler (Shepard & Metzler, 1971) mit der Instruktion eine Paritätsentscheidung zu treffen. In einer zusätzlichen Bedingung hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit durch einen Drehknopf den Distraktor in die gleiche räumliche Orientierung zu drehen wie den Standardstimulus. Die Versuchspersonen drehten zunächst den Distraktor in die gleiche Orientierung und drückten dann die Reaktionstaste für gleich/gespiegelt. Es zeigte sich, dass die Möglichkeit zur *manuelle* Rotation, während der mentale Rotation einen ähnlichen Winkeleffekt aufwies, wie die mentale Rotation. Die Reaktionszeit war hierbei insgesamt schneller als in der Bedingung bei der es keine Möglichkeit zu einer manuellen Rotation gab. Im nachfolgendem Experiment wurden nun versucht Ähnlichkeit zwischen manueller und mentaler Rotation näher zu untersuchen. Die entscheidende Bedingung war nun, dass die Versuchspersonen während der mentalen Rotation den Drehknopf einmal mit dem Uhrzeigersinn und einmal gegen den Uhrzeigersinn drehen sollten - ohne dass die Betätigung des



Drehknopfs eine Orientierungsänderung des Distraktors zur Folge hatte. Interessanterweise zeigte sich eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit wenn die Drehrichtung des Drehknopfs mit der Rotationsrichtung der mentalen Rotation übereinstimmte. Es zeigte sich dagegen eine Verzögerte Rotationsgeschwindigkeit wenn diese beiden Bewegungsrichtungen nicht übereinstimmten. In einer Kontrollbedingung sollten die Versuchspersonen eine Bewegung mit dem Arm von links nach rechts und v.v. ausführen (Translation), während sie mental rotierten. Hier zeigte sich *kein* Einfluss der Bewegung auf die Rotationsrichtung. Der Einfluss der Drehbewegung des Knopfs war auch dann *nicht* zu beobachten, wenn die Achse, an der Distraktor rotiert werden musste nicht mit der Drehachse des Knopfs übereinstimmte. D.h. nur wenn die Versuchspersonen eine Kreisähnliche Bewegung ausführten, die in auf der gleichen Achse erfolgte, wie der Distraktor mental rotiert werden musste, zeigte sich eine starke Interferenz der beiden Bewegungen auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit. Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) diskutiert diese Ergebnisse auf der Ebene der Handlungsplanung: „*Thus the interaction discovered here seems to work at a relatively high level of motor processing, which therefore perhaps should be better termed a level of action planning*“. D.h. nicht die Ausführung einer Bewegung führt zu einer Interferenz mit der mentalen Rotation (siehe Translation), sondern die *Vorbereitung* oder die *Planung* (Programmierung) einer Bewegung, die ähnliche Eigenschaften wie die mentale Rotation besitzt (kreisförmig) interagiert mit der Rotation eines vorgestellten Objekts. Damit interpretiert Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) seine Ergebnisse auf einer ganz ähnlichen Weise wie Kosslyn (Kosslyn, 1994), der die mentale Rotation als eine in „Bewegung-Setzung“ (*motion-added*) eines Vorstellungsobjekts ansieht.

Die Interpretation der Ergebnisse von Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) und der von Kosslyn (Kosslyn, 1994) vorgeschlagenen Erklärung können damit zu einer *common-processing* Hypothese zusammengefasst werden, deren zwei wesentliche Bestimmungsstücke sind: (a) die Vergleichbarkeit der mentalen und manuellen Rotation und (b) die Interdependenz der mentalen Rotation und der kreisförmigen Bewegungsausführung. An späterer Stelle wird aus neuronaler Sicht die Plausibilität dieser common-processing Hypothese diskutiert werden. Zunächst jedoch, muss m.E. diese (prozedurale) Hypothese um

ein weiteres Bestimmungsstück ergänzt werden (c) : Die Ergebnisse von Experiment 1a und 1b deuten daraufhin, dass auch die *Wahrnehmung einer Kreisbewegung* zu einer Interferenz mit der mentalen Rotation führt. Diese Interferenz drückt sich in der Rotationsgeschwindigkeit aus, die im kongruenten Fall zu einer Beschleunigung und im inkongruenten Fall zu einer Verlangsamung der Rotation führt.

Die weitere Strategie bestand darin, die Randbedingungen zu bestimmen unter welchen es zu der beschriebenen Interferenz kommt, bzw. welche Faktoren hierfür ausgeschlossen werden können.

## **4.2 Teil 2: Randbedingungen für den Interferenzeffekt**

Die zuvor vorgeschlagene Ergänzung der *common-processing* Hypothese beruht auf der Interpretation der Ergebnisse von Experiment 1a und 1b. Das hierbei verwendete Paradigma war in der Lage, aufgrund der kreisförmigen Bewegung des Zielreizes eine Beschleunigung/Verlangsamung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit hervorzurufen. Damit konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Ausführung einer kreisförmigen Bewegung der Hand (Teil (b) der *common-processing* Hypothese Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) mit der mentalen Rotation interferiert, sondern auch die kreisförmige Rotation des Zielreizes zum Zeitpunkt der mentalen Rotation - Teil (c) der *common-processing* Hypothese. Diese Ergänzung beruht nun aber auf der Annahme, dass diese kreisförmige Bewegung während der *gesamten mentalen Rotation sichtbar* sein muss. Diese Annahme impliziert, dass es die Interferenz *kontinuierlich*, sozusagen *summarisch* auf die mentale Rotation einwirkt. Die Annahme steht damit auch im Einklang mit den Ergebnissen aus beiden zuvor diskutierten Ergebnissen (Experiment 1a und 1b), wonach die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Kongruenzbedingungen mit zunehmender Winkeldisparität zunimmt. Es ist aber auch denkbar, dass die Interferenz nur dadurch zustande kommt, dass in der Initialisierungsphase der mentalen Rotation die Rotationsrichtung des Zielreizes (einmalig) ausgewertet wird, und zur Interferenz führt - die kontinuierliche Bewegung des Zielreizes

wäre dann im weiteren Verlauf, bis die Paritätsentscheidung gefällt wird, unerheblich für diesen Effekt.

#### 4.2.1 Experiment 2a

Dass die Interferenz nicht darauf zurückzuführen ist, dass nur die Initialisierungsphase der mentalen Rotation mit der Bewegungsrichtung interferiert, und hiernach von der Bewegung des Zielreizes nicht mehr weiter beeinflusst wird, konnte das leicht veränderte Paradigma im Experiment 2a zeigen. Hier wechselte der Zielreiz nachdem er einen Viertelkreis ( $90^\circ$ ; gleicher Radius wie Experiment 1a und 1b) beschrieben hatte seine Bewegungsrichtung. Die Versuchspersonen sahen nun also einen Zielreiz, der nach 250ms seine Rotationsrichtung jeweils in die Gegenrichtung (mit bzw. gegen den Uhrzeigersinn) änderte. Diese Pendelbewegung war, wie im Anschluss im Einzelnen dargelegt werden wird, nicht in der Lage eine Interferenz auszulösen.

**Der Winkelleffekt:** Auch mit diesem Paradigma war es möglich einen deutlichen Winkelleffekt auszulösen. Die Reaktionszeiten stiegen signifikant mit der zunehmenden Winkeldisparität des Zielreizes zu seiner normalen aufrechten Orientierung. Wir finden in dieser Untersuchung den Onset der Reaktionszeiten bei ca. 860 ms (in der  $0^\circ$ -Bedingung). Damit finden wir hier eine leichte Verzögerung des Onsets gegenüber im Experiment 1a (805 ms) und Experiment 1b (650 ms). Eine Ursache für diese generelle Erhöhung der Reaktionszeiten ist vielleicht darin zu sehen, dass die Reizevaluierung unter der Bedingung der Pendelbewegung des Reizes erschwert sein könnte, und damit zu einer Differenz von ca. 50-80 ms (gemittelt über alle experimentellen Faktoren) im Vergleich zu Experiment 1a geführt hat. Wir finden weiterhin keinen Hinweis auf eine Maximumverschiebung. Das Maximum findet sich, wie auch schon im Experiment 1a, bei einer Winkeldisparität des Zielreizes von  $180^\circ$ . Ein asymmetrischer Verlauf der Reaktionszeiten vor und nach dem Richtungswechsel ( $180^\circ$ ) der mentalen Rotation ist ebenfalls nicht auszumachen. Die erhobenen Fehlerraten decken sich mit den in den Effekten mit den Reaktionszeiten und lassen ebenfalls keinen Hin-

weis auf einen speed-accuracy Effekt erkennen. Insgesamt repliziert der Winkelleffekt die Ergebnisse aus den beiden zuvor berichteten Experimenten, und stellt somit eine Validierung des Paradigmas dar.

**Der Kongruenzeffekt:** Die Kongruenz wurde in dieser Untersuchung mit der *Initialbewegung* des Zielreizes festgelegt. War die erste vom Zielreiz ausgeführte Bewegungsrichtung identisch mit der mentalen Rotationsrichtung, so wurde dieser Trial als kongruent bezeichnet - waren diese beiden Bewegungsrichtungen hingegen entgegengesetzt, so stellte dies einen inkongruenten Trial dar. Neben den oben berichteten Winkelleffekt, war der so gebildete Faktor auch in der Lage die Reaktionszeiten zu beeinflussen. Wir finden hier einen leichten Haupteffekt der Kongruenz. D.h. immer dann wenn die beiden Bewegungsrichtungen kongruent zueinander sind, so reagieren die Versuchspersonen schneller, als wenn diese Bewegungsrichtungen inkongruent zueinander waren. Es scheint demnach so zu sein, dass die Kreisbewegung des Zielreizes während der Startphase der mentalen Rotation in der Lage ist, einen positiven bzw. negativen Einfluss auf die mentale Rotation auszuüben. Die ausbleibende Interaktion der beiden Faktoren Kongruenz x Winkeldisparität, bzw. der fehlende Einfluss der Kongruenz auf die Rotationsgeschwindigkeit ist aber ein deutlicher Hinweis auf eine andere Wirkweise dieser Bewegungsart des Zielreizes, als in den Untersuchungen zuvor. Hier zeigt der Zielreiz für 250 ms eine eindeutige Bewegungsrichtung, und wechselt diese in diesem Intervall solange bis die Versuchsperson ihre Paritätsentscheidung abgibt. D.h. nur in dieser ersten Phase ist die Wirkung der Bewegungsrichtung vergleichbar mit der, die vom Zielreiz in den beiden Experimenten 1a und 1b ausgeführt wurde. In diesen beiden Untersuchungen war deutlich zu sehen, dass die Interferenz mit der zunehmenden Winkeldisparität zunahm - je länger die mentale Rotation andauerte, umso größer wurde die Differenz. Anders als bei Jolicoeur und Cavanagh (Jolicoeur & Cavanagh, 1992), wo der rotierende Hintergrund des Zielreizes nicht in der Lage war, eine Interferenz auf die Rotationsgeschwindigkeit auszuüben, sehen wir hier eine Interferenz, die aber wohl nur in Startphase wirksam zu sein scheint.

Dieser Befund schließt demnach die Erklärung des Interferenzeffekts aufgrund einer Vorgabe einer Bewegungsrichtung aus: Der Interferenzeffekt kommt nicht dadurch zustande, dass am Anfang der mentalen Rotation eine bestimmte Rotationsrichtung „vorgegeben“ wird, und die Versuchspersonen in diese Richtung rotieren. Der Befund ist damit vergleichbar zu der von Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) realisierten Kontrollbedingung, in der nur ein Pfeil auf dem Bildschirm erschien, während die Versuchspersonen mentale rotierten. Auch hier war es nicht möglich eine Interferenz zu erzeugen. Die Versuchspersonen rotierten mental nicht schneller, wenn der Pfeil in die gleiche Richtung der kürzesten Winkelstrecke zeigte - sie rotierten auch nicht langsamer, wenn der Richtungspfeil in eine entgegengesetzte Richtung zeigte. Problematisch bei der Untersuchung von Wohlschläger et al. (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) erscheint jedoch der Einwand, dass die Versuchspersonen den Richtungspfeil überhaupt wahrgenommen haben. Es ist denkbar, dass die Versuchsteilnehmer den Richtungspfeil einfach ignorierten. Einen Hinweis auf eine solche Strategie ist der fehlende Haupteffekt, der von diesem experimental Faktor hätte ausgehen müssen. Die dargelegten Ergebnisse des Experiments 2a zeigen einen, wenn auch im Ausmaß kleinen, Effekt der Bewegungsrichtung des Zielreizes. Dies deutet darauf, dass die Initial-Bewegungsrichtung sehr wohl ausgewertet wurde - als Resultat dieser Auswertung, sehen wir hier eine Beschleunigung/Verlangsamung der Reaktionszeiten. Da der Zielreiz jedoch im weiteren Verlauf der mentalen Rotationsphase keine eindeutige Richtungsinformation mehr enthält, rotiert die Versuchsperson mental weiter, idem sie vermutlich die Bewegung des Zielreizes ignoriert. Als Folge dieser Strategie ist das Ausbleiben einer Wechselwirkung der beiden Faktoren Bewegungsrichtung x Winkeldisparität anzusehen.

Ist aber der Interferenzeffekt auch dann zu beobachten, wenn die Bewegung nicht von dem Zielreiz ausgeht? Es ist auch denkbar, dass die Interferenz dadurch zustande kommt, dass die Versuchspersonen eine eindeutige Kreisbewegung wahrnehmen ohne dass diese zwangsläufig mit dem Zielreiz gekoppelt sein muss, und es hierdurch zu einer Beschleunigung bzw. Verlangsamung in der Rotationsgeschwindigkeit kommt. Wenn dies der Fall wäre, so wäre damit eine

weitere, ganz wesentliche Eigenschaft der mentalen Rotation aufgedeckt: Der Ort der Interferenz wäre damit in dem Modul zu suchen, welches für die Auswertung einer bestimmten Bewegungsrichtung zuständig ist. Das würde dann auch bedeuten, dass ein Grossteil der mentalen Rotation von diesem Modul bewerkstelligt wird. Damit aber wäre gezeigt, dass die mentale Rotation kein visueller Prozess ist, bei welchem das *bildhafte* transformieren eines vorgestellten Objektes ein wesentliche Eigenschaft ist (siehe hierzu Kosslyn, 1994). Es wäre vielmehr ein Hinweis darauf, dass die mentale Rotation ein Prozess ist, dessen wesentliche Eigenschaft die *Bewegung* ist, die nicht zwangsläufig bildhaft sein muss.

#### **4.2.2 Experiment 2a**

Mit Hilfe des veränderten Paradigmas sollte die oben angesprochene Eigenschaft der mentalen Rotation untersucht werden. Wenn es gelingt, einen ähnlichen Effekt auf die Rotationsgeschwindigkeit hervorzurufen, indem eine Kreisbewegung während der mentalen Rotation präsentiert wird, die nicht von dem eigentlichen Zielreiz ausgeführt wird, so wäre die Erklärung für die zuvor beschriebene Interferenz weit sparsamer in ihren Annahmen. Sie wäre dann nur in der Bewegung des Zielreizes zu suchen, und nicht darin, dass die mentale Rotation und die visuelle Wahrnehmung ein gemeinsames Modul nutzen (siehe hierzu die oben beschriebene *common-processing* Hypothese). Kosslyn (Kosslyn, 1983; Kosslyn, 1994) geht davon aus, dass die visuelle Vorstellung und visuelle Wahrnehmung durch die gemeinsame Nutzung eines Moduls (*visual buffer*) miteinander verbunden sind. Die mentale Rotation (hier als ein Vorstellungsprozess verstanden) greift auf diesen *visual-buffer* zu, um die Transformationsergebnisse quasi vor dem geistigen Auge, sichtbar zu machen. Wäre nun die Interferenz einer physikalischen Bewegung auf die mentale Rotation auch durch die Wahrnehmung einer solchen Bewegung, die nicht durch den Zielreiz erfolgt, sondern durch z.B. einen Punkt, der um den Zielreiz rotiert, so wäre der Ort der Interferenz nicht im *visual-buffer* zu suchen, sondern in dem Modul, welches z.B. für die Transformation der Koordinaten des Vorstellungs-Objekts zuständig ist.

Die Daten des Experiments 2b sprechen gegen eine solche Sichtweise. Die Rotation eines Punktes um den Zielreiz war nicht in der Lage eine Verlangsamung/Beschleunigung der mentalen Rotation zu bewirken.

**Der Winkeleffekt:** Erwartungsgemäß konnten wir auch in diesem Experiment einen deutlichen Winkeleffekt beobachten. Auch hier zeigen die Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität einen deutlichen Anstieg. Der Onset der Reaktionszeiten (gemittelt über alle experimentellen Faktoren) liegt hier bei 560 ms. Damit zeigt sich eine Reaktionszeit für die 0°-Bedingung, die geringer ist als für alle bisher berichteten Experimente. Hier ist zu vermuten, dass aufgrund des *statischen* Zielreizes eine generell schnellere Identifikation des Reizes möglich war, als im Vergleich zu den übrigen Experimenten. Ein weiterer Grund für die generell erhöhte Latenz stellt die positionelle Sicherheit des Zielreizes dar. Der Zielreiz erschien stets an der gleichen Position. In allen übrigen bisher geschilderten Experimenten, erschien der Zielreiz auf einer von vier möglichen Positionen. Für die Versuchsperson war die Position nicht vorhersagbar, der Reiz konnte entweder auf der 12 Uhr, 15 Uhr, 18 Uhr oder der 21 Uhr Position des Kreises erscheinen, der durch die vom Zielreiz beschriebene Umlaufbahn gebildet wurde. Die positionelle Sicherheit hier kann ebenfalls dazu geführt haben, dass die Versuchspersonen schneller den Zielreiz entdecken konnten, und somit schneller die Paritätsentscheidung treffen konnten.

**Der Kongruenzeffekt:** Neben der kongruenten bzw. inkongruenten Bewegungsrichtung des Punktes um den Zielreiz wurde auch die *Bewegungsart* variiert. Zum einen konnte der Punkt eine pendelförmige Bewegungsart um den Zielreiz, und zum anderen eine gleichförmige Bewegung (mit oder gegen den Uhrzeigersinn) ausführen. Die Pendelbewegung wurde, wie im Experiment 2a, dadurch realisiert, indem der Punkt nach einem Viertelkreis die Bewegungsrichtung umkehrte. Das Zeit-Intervall nachdem die sich Bewegungsrichtung änderte betrug 250 ms. Diese Art der Bewegung verursachte weder einen reliablen Einfluss auf die Reaktionszeit noch auf die Fehlerrate. D.h. die Versuchsperson war in der Lage diese Bewegungsart des Punkts zu ignorieren und die mentale Rota-

tion auszuführen. Die gleichförmige Bewegung hingegen hatte einen Einfluss auf die Reaktionszeit. Wir konnten hier eine Interaktion der Winkeldisparität beobachten: Bis zur 180°-Bedingung sehen wir schnellere Reaktionszeiten unter der Bedingung einer gleichförmigen Bewegung des Punktes um den Zielreiz. Wechselt aber nun die Richtung der mentalen Rotation (Winkeldisparitäten über 180°) sehen eine Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit. Hierdurch kommt es dann auch zu einem deutlich asymmetrischen Verlauf der Reaktionszeiten vor und nach der 180°-Wendemarke. Anders formuliert heißt das, dass die Versuchspersonen schneller reagieren, wenn sie eine mentale Rotation gegen den Uhrzeigersinn ausführen und gleichzeitig eine gleichförmige Bewegung des Punktes um den Zielreiz zu sehen ist. Dieser Performance-Vorteil kehrt sich jedoch um, wenn die mentale Rotation mit dem Uhrzeigersinn ausgeführt wird. Da jedoch dieser kontra-intuitive Effekt nicht mit der Bewegungsrichtung interagiert, und somit nicht im Fokus der Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist, muss er an dieser Stelle unerklärt bleiben. Auf der anderen Seite stellt dieser Effekt aber dennoch eine Art Validierung des Paradigmas dar: Zum einen finden keinen Hinweis darauf, dass die Bewegungsrichtung des Punktes um den Zielreiz (unabhängig von der Bewegungsart) einen reliablen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit ausübt. Zum anderen kann es aber auch sein, dass die Versuchspersonen die Bewegung des Punktes ignorieren konnten, ihn quasi gar nicht wahrgenommen haben könnten. Gegen diesen Einwand spricht zu einen die räumliche Anordnung des Zielreizes und Punktes. Der Zielreiz wurde zentral dargeboten, und der Radius, der von dem Punkt um den Zielreiz beschrieben wurde beträgt 3,43° Sehwinkel. Somit lässt sich davon ausgehen, dass der Punkt innerhalb des Gesichtsfeldes der Versuchsperson lag - und somit auch wahrgenommen wurde. Zum anderen spricht aber auch der oben beschriebene Effekt der Bewegungsart auf die Reaktionszeit. Es lässt sich nur über die Ursache dieses Effekt spekulieren, aber er spricht doch dafür, dass der Punkt auch während der mentalen Rotation wahrgenommen wurde.

Mit dem Befund, dass sich die mentale Rotationsgeschwindigkeit nicht unter dem Einfluss einer Kreisbewegung eines irrelevanten Reizes beeinflussen lässt, konnte eine weitere Randbedingung für den in Experiment 1a und 1b beo-



bachteten Interferenzeffekt definiert werden: Die Wahrnehmung einer Kreisbewegung, die nicht an den Zielreiz gekoppelt ist, reicht nicht aus, um die mentale Rotationsgeschwindigkeit reliabel zu beeinflussen. Der Interferenzeffekt scheint daher ein Hinweis auf eine zentrale Eigenschaft der mentalen Rotation zu sein: Der Zielreiz selbst wird in eine Rotationsbewegung versetzt. Als Folge hiervon, interferiert die Wahrnehmung einer Kreisbewegung des Zielreizes mit der mentalen Rotation.

### **4.3 Teil 3: Lokalisation der Verarbeitungsstufe**

Betrachtet man kognitive Leistungen als eine Reihe distinkter Verarbeitungsstufen (siehe z.B. Cohen & Squire, 1980; Damasio, 1985; McClelland, 1979; Sanders, 1980; Sternberg, 1969), so stellt sich die Frage nach der *Zahl der Verarbeitungsstufen* innerhalb einer kognitiven Leistung (hier: die mentale Rotation). Weiterhin stellt sich auch die Frage, ob die einzelnen Stufen strikt sequentiell abgearbeitet werden, oder ob es auch zeitliche Überlappungen zwischen einzelnen Stufen gibt? Sternbergs (Sternberg, 1969) Verfahren zur Identifizierung von Verarbeitungsstufen und zu Reaktionszeitfraktionierung geht davon aus, dass die Stufen streng diskret nacheinander durchlaufen werden - eine Verarbeitungsstufe kann nur dann beginnen, wenn die vorhergehende beendet ist. Dieser Denkansatz sagt ganz spezifische Faktoren voraus, die *additive* Effekte in einem experimentellen Design haben werden. Dieser Ansatz führte zu einer ganzen Reihe erfolgreicher Untersuchungen über die Struktur kognitiver Prozesse (Sanders, 1980; Sanders, 1983; Sternberg, 1975). Ruthruff und Miller (Ruthruff & Miller, 1995) konnten zeigen, dass die Annahme dieses Modells - also der streng sequentielle und diskrete Ablauf der einzelnen Verarbeitungsstufen - im Falle der mentalen Rotation nicht völlig berechtigt zu sein scheint. Sie konnten vielmehr zeigen, dass die Stufe der Reizidentifizierung *nicht* abgeschlossen sein muss, *bevor* die mentale Rotation beginnen kann. D.h. die Stufe der Reizidentifizierung und die Stufe der mentalen Rotation überlappen zeitlich. Dies ist dann möglich, wenn genügend Informationen über die Identität eines Reizes vorliegen um die mentale Transformation zu beginnen, ohne dass völlige Klarheit über die

Identität des Reizes herrscht. Am Beispiel der beiden Buchstaben „F“ und „P“, die beide um 180° gedreht sind, sei dies verdeutlicht: Für den Beginn der mentalen Rotation genügt die Information, dass der Reiz aus mindestens einer Vertikalen besteht. Die weitere Analyse der Form des Reizes (Reizidentifikation) kann dann parallel zur mentalen Rotation geschehen, die damit beschäftigt ist, die Vertikale zu rotieren. Die mentale Rotation kann jedoch nicht abgeschlossen werden, bevor der Reiz nicht gänzlich identifiziert ist, da die weiteren Angaben über die Form des Reizes für die Paritätsentscheidung notwendig sind. Genau zu dieser Interpretation kommen Ruthruff und Miller (Ruthruff & Miller, 1995), indem sie in ihrer Untersuchung (Experiment Nr. 3 in Ruthruff & Miller, 1995) die mentale Rotation mit einem zusätzlichen experimentellen kombinierten. Sie finden, dass die Diskriminabilität des Zielreizes unteradditiv mit dem Effekt der Winkeldisparität ist. Wenn also die Diskriminabilität eines Reizes z.B. erschwert wird, findet man nicht, wie es ein sequentiell diskretes Modell vorhersagen würde, einen additiven Effekt der Diskriminabilität auf den Winkeleffekt - vielmehr bleibt dieser Effekt unteradditiv und erlaubt somit die Aussage, dass die mentale Rotation bereits zu einem Zeitpunkt beginnen kann, zu dem die Reizidentifikation noch nicht abgeschlossen ist. Sie stellen aber weiterhin fest, dass zu diesem Überlappungszeitpunkt der beiden Verarbeitungsstufen, nur wenig mental rotiert wird. D.h. die mentale Rotation profitiert nur bei großen Winkeldisparitäten - also aufwendigen Rotationen, von dieser zeitlichen Überlappung.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, diejenige Verarbeitungsstufe zu identifizieren, auf welcher der beschriebene Interferenzeffekt wirkt. Aus den Experimenten 1a und 1b konnte ja schon vermutet werden, dass die Kreisbewegung des Zielreizes auf der gleichen Stufe wie die mentale Rotation ansetzt. Aus dieser Vermutung folgt dann die Vorhersage, dass die Bewegungsrichtung des Zielreizes nicht auf einer gemeinsamen Stufe, wie z.B. die Reizidentifikation wirksam sein kann. Diese Vorhersage konnte aufgrund der Befunde des Experiments 3 bestätigt werden. Neben einem deutlichen Winkeleffekt, konnten wir einen signifikanten Haupteffekt „Diskriminabilität“ ausmachen. D.h. leicht voneinander zu diskriminierende Reizpaare gingen mit einer schnelleren Reaktion einher, als im Vergleich zu den schwerer zu diskriminierenden Reizen. Das

Hauptinteresse jedoch galt der Interaktion dieses Faktors mit den Faktoren „Winkeldisparität“ und der „Kongruenz“ der Bewegungsrichtung des Zielreizes. Hier zeigte sich, dass die „Diskriminabilität“ mit der „Kongruenz“ interagierte, aber nicht mit der „Winkeldisparität“. Hierzu die Ergebnisse im einzelnen:

**Der Winkeleffekt:** Für die Lokalisation der Verarbeitungsstufe war es zunächst einmal notwendig, dass wir auch in diesem Paradigma einen deutlichen Winkeleffekt erhalten. Unabhängig davon, ob die Reizpaare, die jeweils in einem Block dargeboten wurden schwer oder leicht voneinander zu diskriminieren waren, zeigte sich ein Winkeleffekt. Der Onset der Reaktionszeiten lag in diesem Experiment bei 940 ms (0°-Bedingung) und erreichte das Maximum unter der Bedingung einer Kongruenz der beiden Bewegungsrichtungen in der 180°-Bedingung bei 1340 ms. Eine Verschiebung des Maximums in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des Zielreizes, wie es von Corballis und McLaren (Corballis & McLaren, 1982), Heil et al. (Heil et al., 1997) und in der vorliegenden Arbeit vom Experiment 1b berichtet wurde, konnte wiederum nur für die inkongruente Bedingung ausgemacht werden. Die Versuchspersonen benötigten hier in der Bedingung 200°-Winkeldisparität mehr Zeit (1355 ms) als für eine Winkeldisparität von 180° (1338 ms). D.h. auch hier neigen die Versuchspersonen dazu, unter der Wahrnehmung einer Kreisbewegung „mit dem Uhrzeigersinn“ die mentale Rotationsrichtung „gegen den Uhrzeigersinn“ über die 180°-Bedingung hin, beizubehalten. Die zweite abhängige Variable „Fehlerrate“ bestätigte diesen Verlauf der Reaktionszeiten jedoch *nicht*. Die Anzahl der falsch beantworteten Reize unter dieser Bedingung unterscheiden sich in bei einer 180°-Winkeldisparität (6,8 %) und bei einer Winkeldisparität von 200° (6,1 %) nicht signifikant voneinander. Diese „Neigung“ kann auch hier nicht weiter erklärt werden, und bleibt ein Gegenstand der Spekulation.

**Der Diskriminabilitätseffekt:** Die Diskriminabilität wurde in dieser Untersuchung ähnlich wie bei Ruthruff und Miller (Ruthruff & Miller, 1995) über die Zusammensetzung der Reizpaare realisiert. Ein Block enthielt nur zwei mögliche Buchstaben, die zur Paritätsbeurteilung vorgelegt wurden. Dieses Reizpaar

enthielt entweder leicht voneinander zu diskriminierende Reize (z.B. die Buchstaben „F“ und „g“) oder schwer zu diskriminierende Reize (z.B. den Buchstaben „F“ und die Zahl „7“). Es wurde erwartet, dass die erhöhte Schwierigkeit der Diskrimination sich in einer erhöhten Reaktionszeit ausdrückt. Dies kann als erfüllt gelten: Leicht zu diskriminierende Reizpaare wurden im Mittel ca. 90ms schneller beantwortet, als schwer zu diskriminierende Reize. D.h. wir sehen hier einen Effekt, der sich auf die Höhe des Achsenabschnitts des Reaktionszeitverlaufs bemerkbar macht. Ein Unterschied im Anstieg der beiden Verläufe für leicht und schwer zu diskriminierende Reize war nicht festzustellen. D.h. die Rotationsgeschwindigkeit für beide Bedingungen war gleich. Demzufolge hat die Variation der Diskriminierbarkeit den Startzeitpunkt der mentalen Rotation moduliert: War die Reizdiskrimination erschwert, so wird mehr Zeit für die Reizidentifikation bzw. seine Evaluierung benötigt und damit kann die mentale Rotation erst später starten. Im umgekehrten Fall kann sie früher beginnen, da der Reiz aufgrund seiner erleichterten Diskrimination früher identifiziert wird.

**Der Kongruenzeffekt:** Auch in diesem Paradigma war es möglich einen Interferenzeffekt auszulösen. Die Versuchspersonen trafen ihre Entscheidung immer dann schneller, wenn die Bewegungsrichtung des Zielreizes mit der mentalen Rotationsrichtung identisch war. War die Bewegungsrichtung hingegen inkongruent zur mentalen Rotation, verringerte sich Rotationsgeschwindigkeit. Damit erhalten wir eine Replikation der Befunde aus dem Experiment 1a und 1b. Auch hier zeigte sich die Rotationsgeschwindigkeit unter dem Einfluss einer gleichzeitig sichtbaren Kreisbewegung des Zielreizes, manipulierbar. Erwartungsgemäß zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Kongruenzbedingungen, jedoch keine zwischen den beiden Diskriminationsstufen. D.h. unabhängig davon, ob die beiden Reizpaare leicht oder schwer voneinander zu unterscheiden - und damit der einzelne Reiz zu identifizieren, erfolgte die Rotation gleich schnell. Die Diskrimination wirkte sich damit auf den Y-Achsenabschnitt aus, nicht aber auf den Anstieg der Reaktionszeit. Dieser Befund repliziert zum einen die Ergebnisse von Corballis (Corballis, 1986), der zeigen konnte, dass die mentale Rotation in einem Dual-task Paradigma, bei dem

neben der mentalen Rotation gleichzeitig anderen Informationen im Arbeitsgedächtnis gehalten werden mussten, die mentale Rotation zwar später beginnt, sich ihre Geschwindigkeit nicht ändert. Zum anderen aber, wird diese Sichtweise durch die fehlende Interaktion der Diskriminabilität mit der Winkeldisparität deutlich. Die Diskriminabilität wird hier als Hauptfaktor signifikant, interagiert aber weder mit der Winkeldisparität noch mit der Bewegungsrichtung des Zielreizes. Diese fehlende Interaktion spricht dafür, dass diese beiden Effekte auf unterschiedlichen Verarbeitungsstufen ansetzen. Damit jedoch wird die Null-Hypothese akzeptiert, oder wie Sanders (Sanders, 1998) es ausführt:

*„What should be concluded in the case of a small, insignificant interaction? This leads to the related problem that interference about stages requires accepting the null hypothesis and neglecting the type-2 error.“ (Sanders, 1998 p. 64)*

Dies ist aber nun ein grundlegendes Problem der additiven Faktoren Methode. Die nicht signifikante Wechselwirkung der beiden Faktoren könnte ja auch dadurch zustande kommen, dass die „wahre“ - Unteradditivität durch einen Teil der Reaktionszeitverteilung verschleiert wird. Die Unteradditivität könnte durch einen Teil der schnellen oder extrem langsamen Teil der Reaktionszeitverteilung verdeckt worden sein. Aus dieser Überlegung folgt, dass die Überprüfung des gesamten Reaktionszeitspektrums auf eine Wechselwirkung der beiden Faktoren Diskriminabilität x Winkeldisparität eine „wahre“ Unteradditivität aufdecken könnte. Hierzu wurden in einer weiteren Analyse die Reaktionszeiten pro Versuchsperson, Winkeldisparität, Bewegungsrichtung und Diskriminabilität in Percentile eingeteilt und die Werte innerhalb der Percentile über die Versuchspersonen gemittelt. Die daraus entstehende Reaktionszeitverteilung ist in der nächsten Abbildung dargestellt.

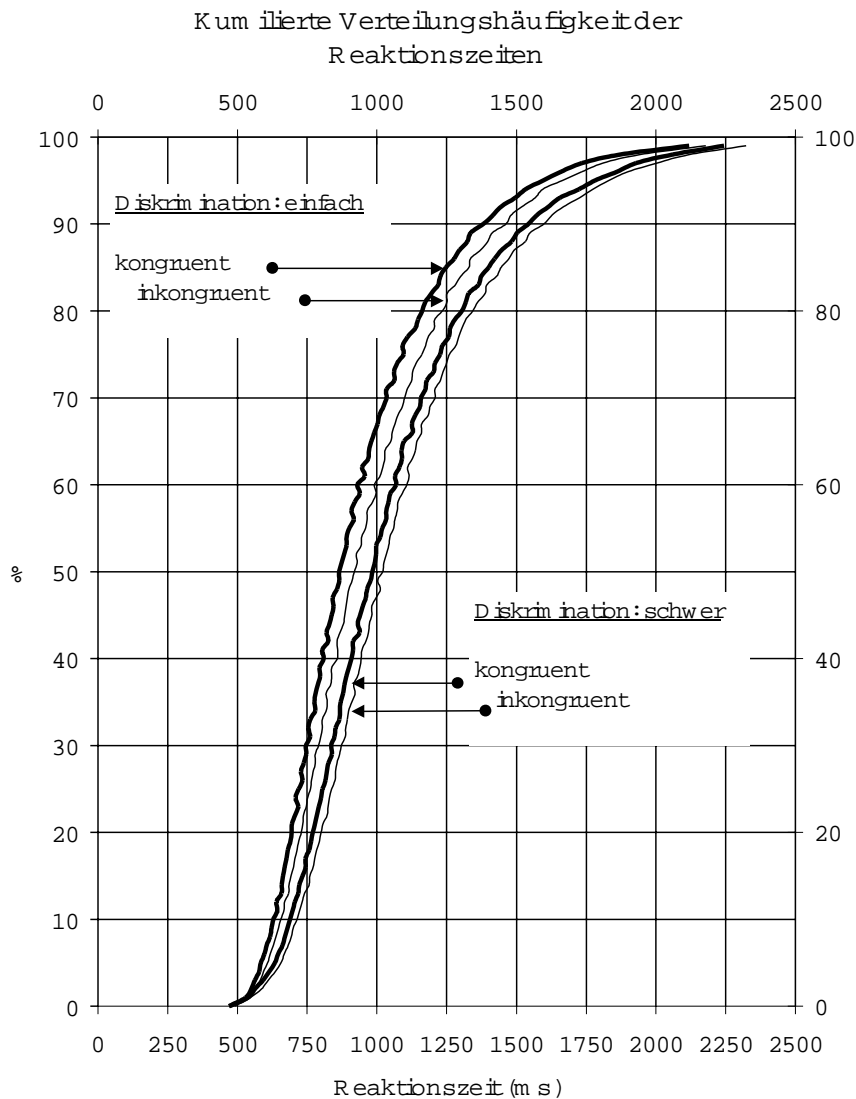


Abbildung 22: Experiment 3: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Reaktionszeiten als Funktion der beiden Diskriminationsstufen und die Kongruenzbedingungen.

Die Varianzanalytische Untersuchung der Faktoren Diskriminabilität und Kongruenz ergab für kein Perzentil eine reliable Wechselwirkung dieser beiden Faktoren (alle F-Werte  $< 2,3$ ; alle  $p(F) > 0,16$ ). Wie in der Abbildung zu erkennen, verlaufen die Reaktionszeiten nahezu parallel. Sie zeigen sich jedoch umso weiter nach rechts verschoben, je schwieriger die Aufgabe (Diskrimination + Kongruenz) wurde. Dieser Verlauf macht deutlich, dass das Ausbleiben einer signifikanten Interaktion der beiden Faktoren Diskriminabilität und Kongruenz nicht auf extrem schnelle (fast guesses) oder überaus langsame Reaktionszeiten zurückgeht, sondern sie über das gesamte Reaktionszeitspektrum nicht zu finden ist. Damit ist zwar das Problem der Akzeptanz einer Null-Hypothese bzw. das

Nichtberücksichtigen des Fehlers 2. Art (Sanders, 1998) nicht völlig ausgeräumt, stellt aber dennoch ein probates Mittel innerhalb der additiven Faktoren Methode bei der Interpretation eines solchen Befundmusters.

Mit dieser Untersuchung war es also möglich, diejenige Verarbeitungsstufe, auf der der Kongruenzeffekt ansetzt durch die Hinzufügung eines weiteren experimentellen Faktors zu identifizieren. Wir konnten hiermit zeigen, dass die Kongruenzbedingung auf der selben Stufe wie die mentale Rotation wirksam ist, und nicht, wie man hätte vermuten können, auf der selben, auf der die Identifikation oder Evaluierung des Zielreizes stattfindet. Empirisch konnte hiermit also gezeigt werden, dass die Stufe der Reizevaluierung durch die verschiedenen Diskriminationsstufen in ihrer Dauer manipuliert werden kann, sie aber keinen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit hat. Die Dauer der mentalen Rotation wird vielmehr neben der Winkeldisparität reliabel durch die Wahrnehmung einer Bewegungsrichtung des Zielreizes beeinflusst. Mit Hilfe der additiven Faktoren Methode ist es nicht möglich die Anzahl der Verarbeitungsstufen zu identifizieren, zweifellos war es damit aber möglich eine (von vielen) Erklärungsmöglichkeiten über das Zustandekommen des Interferenzeffekts auszuschließen.

Die bisherige Diskussion der Befunde aus den durchgeführten Experimenten hatte zunächst das Ziel die Wirksamkeit des neuen Paradigmas kritisch zu hinterfragen. Wir konnten in den Experimenten 1a und 1b zeigen, dass der Interferenzeffekt mit Hilfe dieses Paradigmas zu beobachten ist. Neben der erhöhten Praktikabilität im Vergleich zu dem Bewegungsnacheffekt-Paradigma, haben wir mit diesem Paradigma auch einen eindeutigeren Rückschluss auf die Arbeitsweise der mentalen Rotation erhalten: Die in der *Kontinuirlichkeits-Annahme* (Finke, 1989) ausgedrückte zentrale Eigenschaft der mentalen Rotation konnte somit eine weit stärkere Unterstützung finden, als dies durch die Untersuchung von Cooper (Cooper, 1976) möglich war: Hier konnte zwar gezeigt werden, dass die mentale Rotation eines Vorgestellten Objekts um z.B. 60° die Zwischenposition von 30° durchläuft - damit war aber lediglich genau diese Zwischenposition belegt, nicht aber der eigentliche *Bewegungsaspekt* der mentalen Rotation. Durch die Kombination einer Kreisbewegung mit der mentalen Rotation, und damit die

Beeinflussung der Rotationsgeschwindigkeit, erhielten wir einen stärkeren Hinweis darauf, dass die mentale Rotation tatsächlich mit einer „vorgestellten Bewegung“ einhergeht. Dieser Interpretation kann, wie es das Experiment 2a zeigt, *nicht nur* auf eine Interferenz zwischen Bewegungsrichtung des Zielreizes und der mentalen Rotationsrichtung, die zu Beginn der mentalen Rotation Phase entsteht. Vielmehr basiert der Interferenzeffekt darauf, dass während der gesamten mentalen Rotationsphase die Kongruenz bzw. Inkongruenz besteht. Es kann weiterhin auch ausgeschlossen werden, dass die Interferenz dadurch zustande kommt, dass während der mentalen Rotation eine Kreisbewegung sichtbar ist, wie es durch das Experiment 2b demonstriert wird. Die bloße Wahrnehmung einer Kreisbewegung, die nicht eine Eigenschaft des Zielreizes ist, kann somit nicht für den Interferenzeffekt verantwortlich sein. Abschließend konnten wir mit dem Experiment 3 Hinweise dafür sammeln, auf welcher Stufe der Interferenzeffekt innerhalb der Verarbeitungskette tatsächlich ansetzt. Wir konnten durch die Hinzufügung eines weiteren Faktors, der die Diskriminierbarkeit der Reizes moduliert, zeigen, dass der Interferenzeffekt auf der selben Stufe, wie die mentale Rotation operiert.

Der letzte Teil der Diskussion soll, wie weiter oben angekündigt, eine *neuronalen Sichtweise* auf den Interferenzeffekt liefern. Hier soll zunächst einmal die Plausibilität der von Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) und Kosslyn (Kosslyn, 1994) diskutierten *common-processes* Hypothese geprüft werden und anschließend der Frage nachgegangen werden, an *welchem kortikalen Ort* der Interferenzeffekt vermutet werden kann.



#### 4.4 Über die neuronale Implementierung des Interferenzeffekts

Die bloße Beschreibung einer Interferenzneigung des Informationsverarbeitenden Systems, die unter bestimmten Bedingungen zustande kommt, reicht sicher nicht aus, um das Phänomen hinreichend zu *erklären*. Eine Erklärung kommt vielmehr erst dann zustande, wenn versucht wird, die Ursachen für ein bestimmtes Phänomen zu bestimmen. Eine Theorie hingegen entsteht erst dann, wenn die beschriebenen Ursachen auf eine allgemeinere Arbeitsweise des Gehirns zurückgeführt werden können, und damit die Zahl der möglichen Alternativerklärungen reduziert werden kann. Die neuronale Plausibilität ist hierfür ein Kriterium: Die Erklärung eines kognitionspsychologischen Phänomens erreicht dieses Kriterium erst durch den Abgleich mit Psychophysiologischen Befunden, die die Verankerung und das Zusammenspiel kognitiver Prozesse im Gehirn beschreiben. Auf welche (allgemeine) Arbeitsweise des Gehirns deutet aber der in der vorangegangenen Diskussion dargestellte Interferenzeffekt?

Die bisher dargestellten Befunde deuten m.E. darauf, dass die Interferenz zwischen visueller Wahrnehmung (Kreisbewegung des Zielreizes) und der visuellen Vorstellung (mentale Rotation), durch die gemeinsame Nutzung eines zentralen Moduls des visuellen Systems, zustande kommt. Kosslyn (Kosslyn, 1980; Kosslyn, 1983; Kosslyn, 1990; Kosslyn, 1994) schlägt in einer ganzen Reihe von theoretischen und empirischen Arbeiten eine Theorie der visuellen Vorstellung vor, deren zentrale Aussage auf der Gleichheit von visueller Vorstellung und visueller Wahrnehmung basiert. Dabei geht er von vier zentralen Modulen aus, die an der Transformation eines vorgestellten Objekts beteiligt sind. Innerhalb des visuellen Systems unterscheidet er dabei den *visual buffer*, der topographisch organisierten visuellen Speicher darstellt und für die Figur-Grund Unterscheidung zuständig ist. Der visual buffer wird von Kosslyn (Kosslyn, 1987) aufgrund einer Reihe von Untersuchungen zur visuellen Vorstellung im Okzipitallappen des Gehirns lokalisiert. Mit Hilfe eines Aufmerksamkeitsfensters, dessen Größe variabel ist, werden während der visuellen Wahrnehmung und visuellen Vorstellung spezifische Features des im visual buffer vorliegenden Perzepts selektiert und an das nachgeschaltete System für Musteraktivierung weitergegeben. Unter An-

wendung von Zuordnungsregeln wird zunächst geprüft, welche Teile eines Perzepts im visuellen Speicher der Repräsentation im Musteraktivierungssystem entsprechen. Hauptaufgabe dieses Systems, was keine Information über die räumliche Ausrichtung des Perzepts enthält, ist es, im Langzeitspeicher abgelegte Repräsentationen mit dem vorliegenden, aktuellen Perzept in Übereinstimmung zu bringen. Um eine möglichst deckungsgleiche Übereinstimmung der Repräsentation mit dem Perzept zu erhalten, wird das räumliche Zuordnungssystem aktiviert, welches Informationen aus dem Perzept über seine räumliche Lage und Ausrichtung extrahiert. Das nachgeschaltete Formveränderungssystem kann dann mit diesen Informationen eine Transformation der Repräsentation vornehmen und die Repräsentation zur Deckungsgleichheit mit dem Perzept bringen. Hiernach ist das im visual buffer vorliegende Perzept erkannt, bzw. identifiziert. Die Funktionsweise des Formveränderungssystems ist dabei von zentraler Bedeutung für die mentale Rotation. Das Formveränderungssystem *antizipiert* hierbei, wie die Repräsentation (oder das vorgestellte Objekt) nach einer Veränderung seiner räumlichen Orientierung aussehen müsste. Hier wird also die Konsequenz einer Lageveränderung überprüft. Die Antizipation einer Handlungskonsequenz erfordert die Aktivierung des motorischen Systems. Hier erfolgt die Programmierung einer motorischen Reaktion, die zwar nicht ausgeführt wird, aber eine Schätzung der notwendigen Veränderung der dazugehörigen Parameter liefert. Die mentale Rotation ist dem Kosslynschen System also die Vorwegnahme einer realen motorischen Reaktion. Eine Repräsentation wird in der Vorstellung soweit gedreht bis sie deckungsgleich zu einer gespeicherten Repräsentation des Objekts ist. Hiernach erst erfolgt die Entscheidung über die Parität des dargebotenen Zielreizes und die motorische Reaktion kann erfolgen. Diese Arbeitsweise der mentalen Rotation wird in dem weiter oben angeführten Zitat von Kosslyn verdeutlicht:

*„... motion-added image transformations rely on anticipated consequences of action. Because objects move through trajectories, we typically anticipate seeing them - and visualize seeing them - move in such a manner. And so, we transform objects in small increments.“*  
(Kosslyn, 1994 p. 354).

Dieser Theorie nach müsste also die simultane *manuelle und mentale* Rotation zu einer Interferenz führen, da das motorische System neben der Programmierung der tatsächlichen motorischen Ausführung, gleichzeitig mit der Antizipation der Rotation an einem vorgestellten Objekt, beschäftigt ist. Genau dieses Befundmuster aber findet Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) in seiner Untersuchung. Die Ausführung einer manuellen Rotation, die sowohl auf der gleichen räumlichen Achse als auch in die gleiche Richtung verläuft, wie die gleichzeitige mentale Rotation, führt zu einer Beschleunigung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit. Ist die manuelle Rotation hingegen inkongruent zu der mentalen Rotationsrichtung führt dies zu einer Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit. Damit ist also ein deutlicher Hinweis auf die Beteiligung des motorischen Systems während der mentalen Rotation gegeben.

Warum aber sollte die Wahrnehmung einer Bewegung zu einer ähnlichen Interferenz führen? In der Literatur herrscht eine weitgehende Übereinstimmung darüber, dass der Kortex beim Primaten ein visuelles System aufweist, welches aus zwei parallelen Strängen aufgebaut ist, die jeweils verschiedene Aspekte des visuellen Inputs verarbeiten (Van Essen, Anderson, & Felleman, 1992). Ungerleider und Mishkin (Ungerleider & Mishkin, 1982) konnten zeigen, dass das *ventrale System* für eine feinmaschige Analyse, die die Form und die Farbe des visuellen Inputs zuständig ist. Die hier geleistete Analyse verläuft zwar langsamer als in dem parallelen Strang, dafür aber mit einer weit größeren räumlich Auflösung. Daneben konnten Ungerleider und Mishkin ein sog. *dorsales System* identifizieren, welches für die Analyse der räumlichen Eigenschaften und der Bewegung des Stimulus zuständig ist. Die Aktivität verläuft dabei vom primären visuellen Kortex (V1) über den inferotemporalen Kortex (IT) zu den perirhinalen und präfrontalen Arealen. Das dorsale System, welches neben der Analyse der räumlichen Eigenschaften auch für die Programmierung der visuellen Motorik zuständig ist, arbeitet im Vergleich zum ventralem System schnell, jedoch mit einer weit schlechteren räumlichen Auflösung (Goodale & Milner, 1992). Im dorsalen System geht die Aktivität vom primären visuellen Kortex über die Areale des parietalen- und superior temporalen Kortex zu den prämotorischen und präfrontalen Arealen. Im präfrontalem Kortex projiziert das dorsale System in die dor-

solateralen Areale, wo das Kurzzeit-Gedächtnis für räumliche Lokationen vermutet wird. Das ventrale System hingegen projiziert in die ventralen Areale, die das Kurzzeit-Gedächtnis für Eigenschaften von Objekten bilden.

Studien, die die Gehirnaktivität mit bildgebende Verfahren untersuchten (z.B. mit der *positron emission tomography* [PET], oder der *functional magnetic resonance imaging* [fMRI]) konnten zeigen, dass das krotikale Areal MT (V5) und das MST - beide dem *dorsalem System* nachgeschaltet - mit einer erhöhten Aktivierung antworten, wenn die Versuchspersonen ein bewegten Stimulus wahrnehmen (McCarthy et al., 1995; Tootell et al., 1995; Watson et al., 1993). Überraschenderweise zeigt das MT aber auch eine starke Aktivierung, wenn es die Versuchspersonen ein *vorgestelltes Objekt in Bewegung versetzten*. Goebel, Muckli und Singer (Goebel, Muckli, & Singer, 1998) konnten zeigen, dass die Aktivierung des MT/MST annähernd gleich war, unabhängig davon, ob die Versuchspersonen eine tatsächliche Bewegung eines Stimulus' sahen, oder ob sie ein im Langzeitgedächtnis verfügbares, statisches Objekt in Bewegung versetzten. Sie folgern aus diesem Befund:

*„The presented findings indicate that the constructive visual processes of apparent motion and motion imagery are accomplished within the same specialized areas that are held responsible for the analysis of real motion“. (Goebel et al., 1998 p. 181)*

Ein weiteres Indiz dafür, dass das für die Wahrnehmung von Bewegung zentrale Areals MT/MST auch bei der vorgestellten Bewegung beteiligt ist, stellt eine Untersuchung von Cohen, Kosslyn, Breiter, DiGirolamo, Thompson, Anderson, Bookheimer, Rosen und Belliveau (Cohen, Kosslyn, Breiter, & DiGirolamo, 1996) dar, in welcher die Aktivierung von MT direkt bei einer mentalen Rotation beobachtet werden konnte. In der fMRI-Studie boten sie ihren Versuchspersonen in einer Bedingung Aufgaben zur mentalen Rotation dar und verglichen sie mit einer Kontrollbedingung, in der die Versuchspersonen die gleichen visuellen Stimuli sahen wie in der experimental Bedingung, ohne jedoch mental zu rotieren. Hierbei zeigte sich eine deutliche Aktivierung des Brodmann Areals 39/19, was dem MT beim Menschen entspricht, während der mentalen Rotation.

Damit erhält zum einen die von Wohlschläger (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) und von Kosslyn (Kosslyn, 1994) vertretene common-processes Hypothese weitere Unterstützung, und zum anderen erhalten wir durch diese und die

Zusammenfassend lässt sich das folgende Bild des mentalen Rotations-Prozesses zeichnen: Die Annahme eines ***kontinuierlichen Prozesses***, wie sie in der aufgezeigten Literatur seit den Anfängen dieser Untersuchungsrichtung vorgeschlagen und diskutiert wurde, erhält durch die dargelegten Untersuchungen eine weitere Unterstützung. Die beschriebene Interferenzneigung zeigt deutlich, dass es sich hier um einen Prozess handelt, der während seiner Ausführung mit zentralen Verarbeitungsmodulen interagiert: Sind diese Module genau zu diesem Zeitpunkt mit der Bearbeitung kongruenter Informationen beschäftigt, so „profitiert“ auch der mentale Rotationsprozess hiervon - andernfalls lässt sich eine verlangsamte Verarbeitungsgeschwindigkeit der mentalen Rotation beobachten. Die Befunde sprechen dafür, dass es sich hier *nicht* um einen Prozess handelt, der einmal initiiert, bis zur einer Lösung, quasi abgeschottet von gleichzeitig eintreffenden Informationen, das vorgestellte Objekt in geeigneter Weise transformiert. Vielmehr sprechen die Befunde dafür, dass es sich hier um einen *interaktiven* Prozess handelt, der immer wieder Teilergebnisse zu Kontrollzwecken oder als Folge der simulierten Handlungsantizipation an zentrale Verarbeitungsmodule sendet, und somit vulnerabel gegenüber gleichzeitig vorliegenden, und evtl. anderslautenden Informationen ist.

Die Überprüfung dieser Kontinuitäts-Annahme stellt m.E. einen effektiven Weg dar, zur Beantwortung der Frage *was* den mentalen Rotations-Prozess von anderen kognitiven Prozess unterscheidet, bzw. was *analoge Informationsverarbeitung* beim Menschen bedeutet.

*But whatever the mechanism, perceived and imagined rotation clearly do interact. This further substantiates the idea that perception and imagery share a common representational space, and lends further credence to the notion that there is a truly rotational element underlying mental rotation. (Corballis, 1986 p. 161)*

## 5. Literaturverzeichnis

- Anderson, J. R. (1978). Arguments concerning representations for mental imagery. *Psychological Review*, *85*, 249-277.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Bajric, J., Heil, M., Rösler, F., & Hennighausen, E. (Manuskript in Vorbereitung). A Reply to Cohen and Kubovy (1993).
- Bajric, J., Rösler, F., Heil, M., & Hennighausen, E. (1999). On separating processes of event categorization, task preparation, and mental rotation proper in a handedness recognition task. *Psychophysiology*, *36*, 399-408.
- Bethell-Fox, C. E., & Shepard, R. N. (1988a). Mental Rotation Effects of stimulus complexity and familiarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*, 12-13.
- Bethell-Fox, C. E., & Shepard, R. N. (1988b). Mental rotation: Effects of stimulus complexity and familiarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(1), 12-23.
- Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. G. M., & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behaviour. *Physiological Reviews*, *70*, 1-41.
- Bisiach, E., & Luzzatti, C. (1978). Unilateral neglect of representational space. *Cortex*, *14*(1), 129-133.
- Brunia, C. H., & Damen, E. J. (1988). Distribution of slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *69*(234-243).
- Cohen, D., & Kubovy, M. (1993). Mental rotation, mental representation, and flat slopes. *Cognitive Psychology*, *25*(3), 351-82.
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., & DiGirolamo, G. J. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation: A mapping study using functional MRI. *Brain*, *119*(Pt 1), 89-100.
- Cohen, N. J., & Squire, L. R. (1980). Persevered learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, *210*, 207-210.
- Cooper, L. A. (1975). Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive Psychology*, *7*(1), 20-43.
- Cooper, L. A. (1976). Demonstration of a mental analog of an external rotation. *Perception and Psychophysics*, *19*(4), 296-302.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing*. New York: Academic Press.
- Corballis, M. C. (1986). Is mental rotation controlled or automatic? *Memory and Cognition*, *14*(2), 124-128.

- Corballis, M. C., & Blackman, A. R. (1990). The effect of apparent movement on mental rotation. *Memory and Cognition*, 18(5), 551-5.
- Corballis, M. C., & McLaren, R. (1982). Interaction between perceived and imagined rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(2), 215-224.
- Corballis, M. C., & McMaster, H. (1996). The roles of stimulus-response compatibility and mental rotation in mirror-image and left-right decisions. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 50(4), 397-401.
- Corballis, M. C., & Nagourney, B. A. (1978). Latency to categorize disoriented alphanumeric characters as letters or digits. *Canadian Journal of Psychology*, 32(3), 186-188.
- Corballis, M. C., Zbrodoff, N. J., Shetzer, L. I., & Butler, P. B. (1978). Decisions about identity and orientation of rotated letters and digits. *Memory and Cognition*, 6(2), 98-107.
- Damasio, A. R. (1985). Prosopagnosia. *Trends in Neuroscience*, 8, 132-135.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*(11), 357-427.
- Donders, F. C. (1868). Die Schnelligkeit psychischer Prozesse. *Reichert's und du Bois-Reymonds's Archiv für Anatomie und Physiologie*, 657-681.
- Düker, H. (1965). Hat Jaensch's Lehre von der Eidetik heute noch eine Bedeutung? *Psychologische Beiträge*, 8, 237-253.
- Farah, M. J., & Hammond, K. M. (1988). Mental rotation and orientation-invariant object recognition: Dissociable processes. *Cognition*, 29(1), 29-46.
- Farah, M. J., Soso, M. J., & Dasheiff, R. M. (1992). Visual angle of the mind's eye before and after unilateral occipital lobectomy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 241-246.
- Finke, R. A. (1980). Levels of equivalence in imagery and perception. *Psychological Review*, 87(2), 113-132.
- Finke, R. A. (1985). Theories Relating Mental Imagery to Perception. *Psychological Bulletin*, 98(2), 236-259.
- Finke, R. A. (1989). *Principles of mental imagery*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Finke, R. A., Freyed, J. J., & Shyi, G. C.-W. (1986). Implied Velocity and Acceleration Induce Transformations of Visual Memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 175-188.
- Foerster, B., Gebhardt, R. P., Lindlar, K., Siemann, M., & et al. (1996). Mental-rotation effect: A function of elementary stimulus discriminability? *Perception*, 25(11), 1301-1316.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational Momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10(1), 126-132.
- Frost, B. G., Neill, R. A., & Fenelon, B. (1988). The determinants of the non-motoric CNV in a complex, variable foreperiod, information processing



- paradigm. *Biological Psychology*, 27, 1-21.
- Gardner, H. (1989). *Dem Denken auf der Spur*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Goebel, R., Muckli, L., & Singer, W. (1998). Motion perception and motion imagery: New evidence of constructive brain Processes from functional magnetic resonance imaging studies. In A. D. Friederici & R. Menzel (Eds.), *Learning: Rule Extraction and Representation*. (pp. 167-185). Berlin, New York: de Gruyter.
- Goldenberg, G. (1987). *Neurologische Grundlagen bildlicher Vorstellungen*. Wien, New York: Springer.
- Goldenberg, G. (1989). The ability of patients with brain damage to generate mental visual images. *Brain*, 112, 305-325.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathway for perception and action. *Trends in Neuroscience*, 15, 20-25.
- Guilford, J. P., & Hoepfner, R. (1971). *The analysis of intelligence*. New York: McGraw Hill.
- Haugeland, J. (1981). Analog and analog. *Philosophical Topics*, 12(1), 213-225.
- Heil, M. (1994). *Die Topographie langsamer Gleichspannungspotentiale bei Gedächtnisaktivationsprozessen verbaler und räumlicher Information : Langzeitgedächtnis als Funktion lokalisierter kortikaler Netzwerke*. Unpublished Dissertation, Philipps-Universität, Marburg.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1995). *ERP's during mental rotation: Validating basic assumptions* (Report ). Report: 22. Tagung für Psychophysiologische Methodik.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1996). Event-related potentials during mental rotation: Disentangling the contributions of character classification and image transformation. *Journal of Psychophysiology*, 10(4), 326-335.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(3), 681-692.
- Heil, M., Rösler, F., Link, M., & Bajric, J. (1998). What is improved if a mental rotation task is repeated--the efficiency of memory access, or the speed of a transformation routine? *Psychological Research*, 61(2), 99-106.
- Heller, D., & Ziefle, M. (1993). Der Bewegungsnacheffekt als Analyseinstrument des visuellen Systems. *Zeitschrift für Psychologie*, 201, 317-347.
- Hershenson, M. (1987). Visual system responds to rotational and size-change components of complex proximal motion patterns. *Perception and Psychophysics*, 42(1), 60-64.
- Hershenson, M. (1989). Duration, time constant, and decay of the linear motion aftereffect as a function of inspection duration. *Perception and Psychophysics*, 45(3), 251-257.

- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, *195*, 215-243.
- Huynh, H. S., & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box correction for degrees of freedom from sample data in randomized block and split plot designs. *Journal of Educational Statistics*, *1*, 69-82.
- Jaensch, E. R. (1927). *Die Eidetik und die typologische Forschungsmethode*. (2. ed.). Leipzig: Quelle & Meyer.
- Jeannerod, M. (1992). The where in the brain determines the when in the mind. *Behavioral and Brain Science*, *15*, 212-213.
- Jolicoeur, P., & Cavanagh, P. (1992). Mental rotation, physical rotation, and surface media. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*(2), 371-84.
- Kail, R., & Park, Y.-S. (1990). Impact of practice on speed of mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *49*, 227-244.
- Klix, F. (1971). *Information und Verhalten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Koriat, A., & Norman, J. (1985). Mental rotation and visual familiarity. *Perception and Psychophysics*, *37*(5), 429-39.
- Koriat, A., & Norman, J. (1988). Frames and images: sequential effects in mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *14*(1), 93-111.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Kosslyn, S. M. (1983). *Ghosts in the mind's machine*. New York: Norton.
- Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and imaging in the cerebral hemispheres: A computational approach. *Psychological Review*, *94*(2), 144-175.
- Kosslyn, S. M. (1988). Aspects of a Cognitive Neuroscience of Mental Imagery. *Science*, *240*, 1621-1626.
- Kosslyn, S. M. (1990). Mental Imagery. In D. N. Osherson (Ed.), *Visual Cognition and Action*. (Vol. 2). Cambridge (MA): MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain. The Resolution of the Imagery Debate*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Kosslyn, S. M., Flynn, R. A., Amsterdam, J. B., & Wang, G. (1990). Components of high-level vision: A cognitive neuroscience analysis and accounts of neurological syndromes. *Cognition*, *34*, 203-277.
- Kosslyn, S. M., & Pomerantz, J. R. (1990). Bildliche Vorstellungen, Propositionen und die Form interner Repräsentationen. In D. Münch (Ed.), *Kognitionswissenschaft*. Frankfurt/M: Suhrkamp.
- Kosslyn, S. M., & Pomernatz, J. R. (1977). Imagers, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology*, *9*, 52-76.
- Kuhn, T. S. (1996). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

- Legewie, H., & Wolfram, E. (1992). *Knaurs moderne Psychologie*. München: Droemer Knaur.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492-527.
- Lüer, G., Werner, S., & Lass, U. (1995). Repräsentation analogen Wissens im Gedächtnis. In D. Dörner & E. van der Meer (Eds.), *Das Gedächtnis*. Göttingen: Hogrefe.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman.
- McCarthy, G., Spicer, M., Adrignolo, A., Luby, M., Gore, J., & Allison, T. (1995). Brain activation with visual motion studied by functional magnetic resonance imaging in humans. *Human brain mapping*, *2*, 234-243.
- McClelland, J. L. (1979). On the time relations of mental processes: A framework for analyzing processes in cascade. *Psychological Review*, *86*, 287-330.
- Meyer, D. E., Osman, A. M., Irwin, D. E., & Yantis, S. (1988). The dynamics of cognition and action: Mental processes inferred from speed-accuracy decomposition. *Psychological Review*, *95*, 183-237.
- Miller, J. (1988). Discrete and continuous models of human information processing: In search of partial output. *Acta Psychologica*, *67*, 191-257.
- Neves, D. M., & Anderson, J. R. (1981). Knowledge compilation: Mechanisms for the automatization of cognitive skills. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*. (pp. 57-84). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms for skill acquisition and the law of practice. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition*. (pp. 1-55). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human Problem Solving*. Cliffs, N.J.: Englewood.
- Paivio, A. (1989). A dual coding perspective on imagery and brain. In J. W. Brown (Ed.), *Neuropsychology of visual perception*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Peronnet, F., & Farah, M. J. (1989). Mental rotation: An event-related potential study with a validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, *9*(2), 279-288.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1975). *Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde*. Stuttgart: Klett.
- Pieters, J. P. (1983). Sternberg's additive factor method and underlying psychological processes: Some theoretical considerations. *Psychological Bulletin*, *93*(3), 411-426.
- Prinz, W. (1972). Reaktionszeit-Fraktionierung durch Varianzanalyse? *Archiv für Psychologie*, *124*, 240-252.
- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain. *Psychological Bulletin*, *80*, 1-24.
- Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowl-

- edge. *Psychological Review*, 88(1), 16-45.
- Rehkämper, K. (1995). Analoge Repräsentationen. In K. Sachs-Hombach (Ed.), *Bilder im Geiste. Zur kognitiven und erkenntnistheoretischen Funktion piktorialer Repräsentationen* (pp. 63-106). Amsterdam-Atlanta, GA: Rodopi.
- Rockstroh, B., Elbert, T., Lutzenberger, W., Birbaumer, N., & Roberts, L. E. (1988). Bilateral electrodermal and electrocortical activity in anticipation of sensorimotor tasks. *Psychophysiology*, 25, 185-192.
- Roland, P. E., & Friberg, L. (1985). Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, 53, 1219-1243.
- Rösler, F., Heil, M., Bajric, J., Pauls, A. C., & Hennighausen, E. (1995). Patterns of cerebral activation while mental images are rotated and changed in size. *Psychophysiology*, 32(2), 135-149.
- Rösler, F., Heil, M., & Roeder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology*, 45(1-3), 109-141.
- Rösler, F., Schumacher, G., & Sojka, B. (1990). What the brain reveals when it thinks: Event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *German Journal of Psychology*, 14(3), 185-203.
- Rossi, J. S., & Collyer, C. E. (1986). Is there a threshold for mental rotation? *Bulletin of the Psychonomic Society*, 24(1), 1-3.
- Ruchkin, D. S., Sutton, S., Mahaffey, D., & Glaser, J. (1986). Terminal CNV in the absence of motor response. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 63, 445-463.
- Ruthruff, E., & Miller, J. (1995). Can mental rotation begin before perception finishes? *Memory and Cognition*, 23(4), 408-424.
- Sachs-Hombach, K. (1995). *Bilder im Geiste - Zur kognitiven und erkenntnistheoretischen Funktion piktorialer Repräsentationen*. Amsterdam - Atlanta, GA: Rodopi.
- Sanders, A. F. (1980). Stage analysis of reaction processes. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior*. Amsterdam: North-Holland.
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53, 61-97.
- Sanders, A. F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information. *Acta Psychologica*, 74, 1-45.
- Sanders, A. F. (1998). *Elements of Human Performance: Reaction Processes and Attention in Human Skill*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schumann-Hengsteler. (1995). *Die Entwicklung des visuell-räumlichen Gedächtnisses*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe.
- Shepard, R. N. (1975). Form, formation, and transformation of internal representations. In R. Solso (Ed.), *Information processing and cognition*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.

- Shepard, R. N., & Cooper, L. A. (1982). *Mental images and their transformations*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Shepard, R. N., & Judd, S. A. (1976). Perceptual illusion of rotation of three-dimensional objects. *Science*, *191*, 952-954.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, *171*(972), 701-3.
- Shepard, S., & Metzler, D. (1988). Mental rotation: Effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(1), 3-11.
- Sloman, A. (1971). Interactions between philosophy and artificial intelligence: The role of intuition and non-logical reasoning in intelligence. *Artificial Intelligence*, *2*, 209-225.
- Steiger, J. H., & Yuille, J. C. (1983). Long-term memory and mental rotation. *Canadian Journal of Psychology*, *37*(3), 367-389.
- Stelzl, I. (1982). *Fehler und Fallen der Statistik*. Bern, Stuttgart, Wien: Hans Huber.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica, Amsterdam*, *30*, 276-315.
- Sternberg, S. (1975). Memory Scanning: New findings and current controversies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *27*, 1-42.
- Takano, Y. (1989). Perception of rotated forms: A theory of information types. *Cognitive Psychology*, *21*(1), 1-59.
- Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology*, *21*(2), 233-282.
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary and mental abilities*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Tootell, R. B. H., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Malach, R., Born, R. T., Brady, T. J., Rosen, B.R., & Belliveau, J. W. J. (1995). Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, *15*, 3125-3230.
- Tye, M. (1991). *The Imagery Debate*. Cambridge, Massachusetts  
London, England: A Bradford Book: The MIT Press.
- Ullsperger, P., Gille, H.-G., Pietschmann, M., & Neumann, U. (1986). P300 component of the ERP as an index of processing difficulty. In F. Klix & H. Hagendorf (Eds.), *Human memory and cognitive capabilities. Mechanisms and performances*. (pp. 723-731). Amsterdam: Elsevier.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 549-584). Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Van Essen, D. C., Anderson, C. H., & Felleman, D. J. (1992). Information-processing in the primate visual system: An integrated system perspective. *Science*, *255*, 419-423.

- Wallace, B., & Hofelich, B. G. (1992). Process generalization and the prediction of performance on mentale imagery tasks. *Memory & Cognition*, *20*, 695-704.
- Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviourist views it. *Psychological Review*, *20*(2), 158-177.
- Watson, J. D. G., Frackowiak, R. S. J., Myers, J. V., Woods, R. P., Mazziota, J. C., Shipp, S., & Zeki, S. (1993). Area V5 of the human brain: evidence from a combined study using positron emission tomography and magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, *3*, 79-94.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. (1989). Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, *26*(4), 452-67.
- Wohlschläger, A. (submitted-a). Mental Object Rotation and the Planning of Hand Movements.
- Wohlschläger, A. (submitted-b). Visual motion priming by invisible hand movements.
- Wohlschläger, A., & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(2), 397-412.
- Young, K. U., Palef, S. R., & Logan, G. D. (1980). The role of mental rotation in letter processing by children and adults. *Canadian Journal of Psychology*, *34*, 265.
- Zimmer, H. B. (1992). Von Repräsentationen, Modalitäten und Modulen. *Sprache & Kognition*, *11*(2), 65-74.

## 6. Danksagung

Diese Arbeit entstand an der Philipps-Universität Marburg im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts „*Analoge Informationsverarbeitung*“ (Prof. Dr. F. Rösler und Dr. M. Heil). Sowohl der Philipps-Universität, der DFG als auch den beiden Antragsstellern möchte ich für die Möglichkeit zur Promotion danken.

Wie aber sagt man den *Menschen* danke, die nicht nur die vorliegende Arbeit, sondern - und das zählt zweifellos mehr - das gesamte Denken weit mehr beeinflusst haben, als sie es selbst vielleicht ahnen? In dem sicheren Wissen darüber, dass ein Dankeschön auf dieser Seite hierfür zwar nicht ausreicht, möchte ich es dennoch so versuchen:

**Frank Rösler** möchte ich für die nunmehr fast zehn Jahre andauernde Förderung und Zusammenarbeit danken. Sein Vertrauen in meine Arbeit half, dass es eine schöne Zeit wurde.

**Martin Heil** verdanke ich so ziemlich alles. Sein Verständnis von Wissenschaft und seine eigene Forschung waren mir weit mehr als nur Vorbild.

**Erwin Hennighausen** hat durch seine Art und seine Arbeit mehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen, als ich es ihm je gesagt habe. Seiner Unterstützung war ich mir immer sicher.

**Jascha Rüsseler** sorgte mit seiner Hoffnung, dass die Hertha BSC Berlin auch die nächste Bundesligasaison überleben wird, stets für gute Laune.

**Der gesamten CABA-Gruppe** (die so nett war, da unten noch einmal für mich anzutreten) verdanke ich dies und das, ganz sicher aber auch die Atmosphäre, die gute Arbeit erst entstehen lässt.

Schließlich möchte ich noch **Claudia Kreipl** aus Dutenhofen danken, die stets gute *Rezepte* gegen Übellaunigkeit und allerhand anderer Wehwehchen parat hatte.



Judith Streb, André Knops, Jascha Rüsseler, Hubertus Hahn, Erwin Hennighausen, Maren Struve, Dirk Jäger  
Maren Wolber, Kristina Nielsen, Adjuta Bertsch, Brigitte Röder, Frank Rösler  
Kerstin Jost, Bettina Rolke und Martin Heil

**Euch allen also ein großes Dankeschön - und nix für ungut, woll!**