

Manuelles Training mentaler Rotation

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Gunnar Wiedenbauer
aus Freiburg

im März 2006

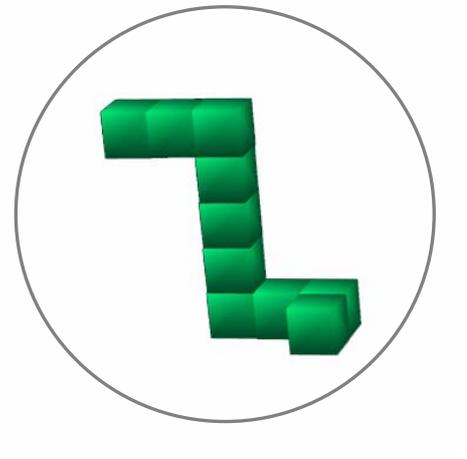
Aus dem Institut für Experimentelle Psychologie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-
Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. Martin Heil

Korreferentin: PD Dr. Petra Jansen-Osmann

Tag der mündlichen Prüfung: 12.05.2006



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Einleitung	9
1.1 Räumlich-kognitive Fähigkeiten.....	10
1.1.1 Klassische räumliche Fähigkeiten.....	11
1.1.2 Räumliche Fähigkeiten in einem Umgebungsraum	13
1.1.3 Räumliche Fähigkeiten bei Patienten mit Spina bifida.....	15
1.1.3.1 Das Krankheitsbild Spina bifida	16
1.1.3.2 Allgemein-kognitive Entwicklung von Kindern mit Spina bifida.....	18
1.1.3.3 Räumlich-kognitive Fähigkeiten von Spina bifida-Kindern.....	19
1.1.3.4 Trainierbarkeit der räumlichen Fähigkeiten von Kindern mit körperlichen Beeinträchtigungen	21
1.2 Das Paradigma der mentalen Rotation.....	22
1.2.1 Einfluss unterschiedlichen Stimulusmaterials.....	24
1.2.2 Holistische und analytische Verarbeitung bei der mentalen Rotation.....	26
1.2.3 Zusammenhang zwischen perzeptueller und mentaler Rotation	28
1.2.4 Beteiligung motorischer Prozesse bei der mentalen Rotation	29
1.2.5 Einfluss des Geschlechts auf die mentale Rotation	35
1.3 Mentale Rotationsfähigkeit von Kindern	37
1.3.1 Studien zur mentalen Rotation bei Kindern	38
1.3.2 Erklärungsansätze zur mentalen Rotation bei Kindern	40
1.4 Training der mentalen Rotation.....	42
1.4.1 Räumlich-kognitives Training.....	43
1.4.2 Studien zum Training der mentalen Rotation	45
1.4.3 Studie eines manuellen Trainings der mentalen Rotation	51
1.5 Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands	53
2 Experiment 1	56
2.1 Methode.....	56
2.1.1 Stichprobe.....	56
2.1.2 Versuchsaufbau	56

2.1.3	Versuchsdurchführung	59
2.1.4	Design und statistische Analyse	60
2.2	Ergebnisse.....	61
2.3	Diskussion	63
3	Experiment 2	65
3.1	Methode.....	65
3.1.1	Stichprobe.....	65
3.1.2	Versuchsaufbau	65
3.1.3	Versuchsdurchführung	68
3.1.4	Design und statistische Analyse	69
3.2	Ergebnisse.....	71
3.3	Diskussion	79
4	Experiment 3	82
4.1	Methode.....	82
4.1.1	Stichprobe.....	82
4.1.2	Versuchsaufbau	83
4.1.3	Versuchsdurchführung	86
4.1.4	Design und statistische Analyse	86
4.2	Ergebnisse.....	87
4.3	Diskussion	95
5	Experiment 4	98
5.1	Vorarbeiten.....	98
5.1.1	Rekrutierung der Kinder und Stichprobe.....	98
5.1.2	Elternfragebogen für Eltern mit Spina bifida-Kindern.....	99
5.1.3	Intelligenz- und Entwicklungstestung.....	100
5.1.4	Untersuchung der räumlichen Fähigkeiten von Spina bifida-Kindern	101
5.1.5	Untersuchung des räumlichen Verhaltens und Wissens von Spina bifida-Kindern	102
5.2	Methode.....	105
5.2.1	Stichprobe.....	105
5.2.2	Versuchsaufbau	105

5.2.3	Versuchsdurchführung	105
5.2.4	Design und statistische Analyse	106
5.3	Ergebnisse.....	106
5.4	Diskussion	113
6	Abschlussdiskussion.....	115
6.1	Der computerbasierte mentale Rotationstest	115
6.2	Leistung in der manuellen Rotation.....	117
6.3	Einfluss des Geschlechts auf die mentale und manuelle Rotation	120
6.4	Effekte des manuellen Rotationstrainings.....	123
6.4.1	Objektspezifität des Rotationstrainings	124
6.4.1.1	Diskussion objektspezifischer Trainingseffekte bei Erwachsenen	124
6.4.1.2	Diskussion objektunabhängiger Trainingseffekte bei Kindern.....	126
6.4.2	Wirkungskomponenten des Trainings	128
6.4.3	Differentielle Trainingseffekte.....	130
6.4.3.1	Einfluss der mentalen Rotationsfähigkeit auf die Trainingseffekte	130
6.4.3.2	Einfluss des Geschlechts auf die Trainingseffekte	132
6.5	Anwendung des Trainings mit Spina bifida-Kindern.....	133
6.5.1	Mentale Rotationsfähigkeit der Spina bifida-Kinder.....	133
6.5.2	Manuelle Rotationsfähigkeit der Spina bifida-Kinder.....	135
6.5.3	Effekte des manuellen Rotationstrainings bei Kindern mit Spina bifida.....	136
6.6	Kritische Anmerkungen.....	138
6.6.1	Auswahl einer geeigneten Beschäftigung der Kontrollgruppe.....	138
6.6.2	Verwendung von Differenzwerten.....	139
6.6.3	Bedeutung der Trainingseffekte	140
6.7	Zusammenfassung und Ausblick.....	140
7	Literatur	143

Anhang

Zusammenfassung

Thema dieser Arbeit ist die mentale Rotation, die einen der drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten darstellt und die kognitive Leistung bezeichnet, ein Objekt mental zu repräsentieren und durch eine Rotation zu transformieren. Sie spielt eine wichtige Rolle sowohl im Alltag als auch in der Berufswelt beziehungsweise in der Schule, zum Beispiel in der Architektur oder im Geometrieunterricht. In einem klassischen mentalen Rotationstest sollen die Probanden entscheiden, ob zwei im Raum gedrehte Objekte identisch oder gespiegelt sind. Dabei nimmt die Reaktionszeit mit ansteigender Winkeldifferenz zwischen den Objekten linear zu (Shepard & Metzler, 1971). Dieselbe „mentale Rotationsfunktion“ konnte auch bei Kindern gezeigt werden, wobei sich die Rotationsgeschwindigkeit mit steigendem Alter erhöht (z.B. Marmor, 1975, 1977; Kail, Pellegrino & Carter, 1980). Neben Geschlechtsunterschieden – Männer scheinen schneller zu sein als Frauen – ist auch die Trainierbarkeit der mentalen Rotation Thema vieler Untersuchungen. Durch die wiederholte Ausführung mentaler Rotationen nehmen die Reaktionszeiten ab (z.B. Cooper, 1975; Kaushall & Parsons, 1981). Dieser Trainingseffekt scheint jedoch sowohl bei Erwachsenen (z.B. Heil, Rösler, Link & Bajric, 1998; Tarr & Pinker, 1989) als auch bei Kindern (Kail & Park, 1990) auf Objekte aus der Übungsphase beschränkt zu sein und somit nicht die räumliche Fähigkeit selbst zu trainieren. In der hier vorliegenden Arbeit wurde angenommen, dass aufgrund der Visualisierung des Rotationsprozesses und des engen Zusammenhangs zwischen mentaler und motorischer Rotation (z.B. Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) durch ein *manuelles* Training der Prozess der mentalen Rotation an sich trainiert werden kann. Um die Effekte eines manuellen Trainings auf die mentale Rotation nachzuweisen, wurden ein computerbasierter mentaler Rotationstest und ein computerbasiertes manuelles Training der mentalen Rotation entwickelt. Es wurde zudem angenommen, dass besonders Kinder mit spezifischen Beeinträchtigungen der räumlichen Fähigkeiten von dem manuellen Training profitieren können (siehe Rizzo et al., 2001).

Nach der erfolgreichen Evaluation des computerbasierten mentalen Rotationstests in Experiment 1 wurde in Experiment 2 das manuelle Training mit Erwachsenen

durchgeführt. Die Trainingsgruppe erzielte im Vergleich zu einer Kontrollgruppe niedrigere Reaktionszeiten nach dem Training. Da die Verbesserung der Trainingsgruppe auf vorher gelernte Objekte begrenzt war, scheint der Trainingseffekt jedoch auch bei einem manuellen Training auf gedächtnisbasierten Prozessen zu beruhen. Während sich die Geschlechter im computerbasierten Rotationstest nicht unterschieden, waren Männer in der manuellen Aufgabe schneller als Frauen.

Mit leicht modifizierten Versionen des mentalen Rotationstests und des manuellen Trainings wurde in Experiment 3 der Trainingseffekt auf die mentale Rotationsfähigkeit von zehn- und elfjährigen gesunden Kindern untersucht. Im mentalen Rotationstest wurde auch für Kinder eine ansteigende mentale Rotationsfunktion gefunden, wobei Mädchen langsamer als Jungen waren. Das manuelle Training verbesserte die mentale Rotationsfähigkeit. Der Trainingseffekt war dabei nicht objektspezifisch und basierte somit auf der Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit an sich.

In Experiment 4 wurde das Training mit Kindern mit Spina bifida, die durch einen Neuralrohrdefekt an körperlichen Beeinträchtigungen leiden und Defizite im räumlich-kognitiven Bereich zeigen, und einer gesunden Kontrollgruppe angewendet. Zum ersten Mal überhaupt wurde die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida umfassend untersucht. Sie schnitten im mentalen Rotationstest deutlich schlechter als die Kontrollgruppe ab und profitierten in höherem Maße als die gesunden Kinder vom manuellen Rotationstraining. Die Ergebnisse zeigen, dass das hier entwickelte Training besonders bei Kindern mit spezifischen Beeinträchtigungen im räumlich-kognitiven Bereich wirksam ist und durch seine einfache Handhabung auch in Schulen und Kliniken verwendet werden könnte.

1 Einleitung

In einer Metaanalyse der räumlichen Fähigkeiten stellten Linn und Petersen (1985) drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten heraus, von denen einer die mentale Rotation darstellt. Mentale Rotation bezeichnet die Fähigkeit, räumliche Information mental zu repräsentieren und diese Repräsentation durch eine Drehung zu transformieren. Sie genießt eine herausragende Stellung innerhalb der räumlichen Fähigkeiten seit Shepard und Metzler 1971 das Paradigma der mentalen Rotation in die kognitive Psychologie einführen. Bis heute wurden 1065 Arbeiten zur mentalen Rotation veröffentlicht (Stand März 2006, Datenbank *PsycInfo*). Aufgabe der Versuchspersonen in der klassischen Studie von Shepard und Metzler war es, so schnell und so fehlerfrei wie möglich zu entscheiden, ob zwei im Raum gedrehte Würfelfiguren identisch sind oder eine Würfelfigur eine gespiegelte Version der anderen ist. Da die Reaktionszeiten der Versuchspersonen für die Lösung dieser Aufgabe linear mit steigender Winkeldisparität zwischen den beiden Figuren stiegen, postulierten Shepard und Metzler eine mentale Rotation der Figuren. Die mentale Rotation soll dabei ein internes Analogon einer externalen Rotation darstellen (Metzler & Shepard, 1982). Diese klassische Studie führte zur Entwicklung eines Forschungszweigs zur mentalen Transformation bildhafter Wissensrepräsentationen. Das Konzept der mentalen Rotation fand nicht nur große Beachtung in der wissenschaftlichen Literatur, sondern auch in der Populärliteratur. In dieser Literatur werden vor allem Geschlechtsunterschiede in räumlichen Fähigkeiten diskutiert, die größtenteils auf Studien zur mentalen Rotation basieren. Die mentale Rotation ist gleichzeitig ein reliabel zu untersuchendes Konstrukt und ein sehr alltagsnaher kognitiver Prozess. Die Rolle der mentalen Rotation im Alltag beschreiben Metzler und Shepard (1982) folgendermaßen (S. 71):

The analog operation that we are specifically considering, viz., “mental rotation”, seems to play a central role in tasks ranging from the relatively mundane and concrete one of planning the arrangement of furniture in a room, to the relatively more intellectual and abstract ones of solving problems in geometry, engineering design, or stereochemistry.

Die mentale Rotation spielt in vielen Berufen wie zum Beispiel im Ingenieurwesen oder im gestalterischen und im medizinischen Bereich eine große Rolle. In der modernen Medizin wird der mentalen Rotation eine große Bedeutung im Bereich der Chirurgie (vor allem in der minimal invasiven Chirurgie) und in der Beurteilung von Ergebnissen bildgebender Verfahren (siehe Hegarty & Waller, 2005) zugeschrieben. Aus anderen Bereichen sei beispielhaft eine Studie von Dror, Kosslyn und Waag (1993) aufgeführt, in der sich zeigte, dass Piloten schneller in der Bearbeitung mentaler Rotationen waren als Nicht-Piloten.

Im Folgenden wird ein Überblick über die räumlich-kognitiven Fähigkeiten gegeben, eine Einordnung der mentalen Rotation vorgenommen und eine Patientengruppe mit stark beeinträchtigten räumlichen Fähigkeiten, nämlich Kinder mit Spina bifida, vorgestellt (Abschnitt 1.1). Im Abschnitt 1.2 werden das Paradigma der mentalen Rotation und verschiedene Forschungsbereiche innerhalb dieses Paradigmas erläutert. Darauf folgend werden im Abschnitt 1.3 die Befunde aus Studien zur mentalen Rotationsfähigkeit von Kindern zusammengefasst, bevor im Abschnitt 1.4 Untersuchungen zum Training der mentalen Rotation dargestellt werden. Abschließend folgt eine Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands.

1.1 Räumlich-kognitive Fähigkeiten

Im folgenden Abschnitt wird eine Einführung in den Bereich der räumlich-kognitiven Fähigkeiten gegeben, um eine Einordnung der mentalen Rotation vornehmen zu können. In einer häufig gebrauchten Definition werden räumliche Fähigkeiten beschrieben als kognitive Leistung, symbolische, nicht sprachliche Information zu repräsentieren, zu transformieren, zu generieren und abzurufen (Linn & Petersen, 1985). Just und Carpenter (1985) zufolge werden räumliche Fähigkeiten immer dann angewendet, wenn eine mentale Repräsentation einer zwei- oder dreidimensionalen Struktur generiert und deren Eigenschaften erfasst oder eine Transformation dieser Repräsentation durchgeführt wird. Im Hinblick auf schulische und berufliche Anforderungen wurde auf die große Bedeutung der räumlichen Fähigkeiten – vor allem der mentalen Rotation – hingewiesen (Hegarty & Waller, 2005; Souvignier,

2000). Seit Thurstone (1938) den Faktor *Space* als einen von sieben Faktoren der primären mentalen Fähigkeiten analysierte, fanden Aufgaben zu räumlichen Fähigkeiten Eingang in die allgemeine Intelligenztestung. Thurstones Faktor *Space* weist eine enge Verbindung mit der mentalen Rotation auf und wird unter anderem erfasst, indem Versuchspersonen Würfel aus unterschiedlichen Perspektiven vergleichen müssen. Exemplarisch für die Bedeutung räumlicher Fähigkeiten in heutigen Intelligenztests sei der Wechsler-Intelligenz-Test für Erwachsene (WISC oder in der deutschen Version HAWIE, Wechsler, 1956) genannt. Dieser Test besteht aus mehreren Untertests, von denen die zum Handlungsteil gehörenden einen engen Bezug zu räumlichen Fähigkeiten aufweisen. So misst beispielsweise der Mosaiktest die Fähigkeit zur Raum-Lage-Erfassung, zur Figur-Grund-Wahrnehmung, zur Formerfassung und zum räumlichen Vorstellungsvermögen.

Zunächst wird auf die klassischen räumlichen Fähigkeiten eingegangen. Demgegenüber stehen die Fähigkeiten in einem Umgebungsraum, die bisher in der Raumkognitionsforschung und in der klinischen Diagnostik vernachlässigt wurden (Hegarty & Waller, 2005) und deshalb hier mit einem eigenen Abschnitt gewürdigt werden. Abschließend wird auf das Krankheitsbild Spina bifida eingegangen, da Patienten mit Spina bifida stark beeinträchtigte räumliche Fähigkeiten zeigen.

1.1.1 Klassische räumliche Fähigkeiten

Die klassischen räumlichen Fähigkeiten werden auch *Small-Scale* Fähigkeiten genannt, was verdeutlicht, dass Aufgaben in diesem Bereich räumliche Information eines kleinen, vom Beobachterstandpunkt vollständig überschaubaren Raums betreffen. In einer Metaanalyse konnten Linn und Petersen (1985) die klassischen räumlichen Fähigkeiten in drei Faktoren einteilen: mentale Rotation, räumliche Veranschaulichung (*Spatial Visualization*) und räumliche Orientierung (*Spatial Perception*). Aufgaben zur räumlichen Veranschaulichung erfordern mehrschrittige Verarbeitung und Manipulation räumlicher Information, wie es zum Beispiel beim *Embedded Figure Test* (Witkin, Oltman, Raskin & Karp, 1971) der Fall ist, in dem eine geometrische Figur (siehe Dreieck in Abbildung 1) in einem Suchbild gefunden werden muss. Tests zur räumlichen Orientierung untersuchen räumliche Beziehungen in Bezug auf den ei-

genen Körper und ob ein stabiles Konzept horizontaler und vertikaler Orientierung im Raum besteht. Klassische Aufgabe ist hierfür die *Wasserspiegel-Aufgabe* mit der schon Piaget und Inhelder (1956) Untersuchungen zur kognitiven Entwicklung von Kindern durchführten. Hierbei soll der Wasserstand in einem Glasgefäß, das gedreht präsentiert wird, angegeben werden. Abbildung 1 zeigt eine Aufgabe aus Tests für jeden der genannten räumlichen Faktoren.



Abbildung 1: Aufgaben aus dem Mentalen Rotationstest (linke Abbildung), Embedded Figure Test (mittlere Abbildung) und dem Wasserspiegel-Test (rechte Abbildung).

Die mentale Rotation ist somit einer der drei Faktoren der klassischen räumlichen Fähigkeiten, was ihre Bedeutung innerhalb der Raumkognition unterstreicht. Des Weiteren scheint sie relativ unabhängig von den anderen Faktoren der räumlichen Fähigkeiten zu sein (z.B. Lohman, 1979). Da die mentale Rotation prägnant umschrieben und ihr Konzept klarer ist als das der anderen beiden Faktoren, stellt sie die am häufigsten untersuchte räumliche Fähigkeit dar. Angemerkt werden sollte, dass die Dreiteilung von Linn und Petersen (1985) eher auf Ähnlichkeiten der kognitiven Prozesse beruht, die zur Lösung räumlicher Aufgaben innerhalb eines Faktors genutzt werden. Andere Einteilungen, zumeist auf Faktorenanalysen beruhend, ähneln der Dreiteilung von Linn und Petersen (Lohman, 1979; McGee, 1979).

Lohaus, Schuhmann-Hengstler und Kessler (1999) untersuchten den Entwicklungsverlauf der drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten nach Linn und Petersen (1985) bei Schulkindern. An der Studie, in der die drei in Abbildung 1 dargestellten Tests verwendet wurden, nahmen über 600 Kinder im Alter zwischen 7 und 15 Jahren teil. Es zeigte sich eine Zunahme der Leistung mit steigendem Alter in allen drei Tests. Zwischen der Wasserspiegel-Aufgabe und der mentalen Rotationsaufgabe gab es

einen Zusammenhang: Kinder, die die Aufgaben im Wasserspiegel-Test korrekt lösten, erzielten die beste Leistung im mentalen Rotationstest, was an der Unabhängigkeit der Faktoren zweifeln lässt.

1.1.2 Räumliche Fähigkeiten in einem Umgebungsraum

Hegarty und Waller (2005) kritisierten, dass eine weitere räumliche Fähigkeit bis heute vernachlässigt wurde: Neben der klassischen Unterteilung räumlicher Fähigkeiten ist das Verhalten im Umgebungsraum (*Environmental* oder *Large-Scale Space*) – definiert als der Raum, der den Betrachter integriert, der aber von einem Beobachterstandpunkt nicht in seiner Gesamtheit eingesehen werden kann – von Bedeutung (siehe auch Quaiser-Pohl, Lehmann & Eid, 2004). Im Unterschied zu den klassischen räumlichen Fähigkeiten wird die räumliche Repräsentation der Umwelt durch die Navigation darin sukzessiv aufgebaut. Untersuchungen von räumlichen Fähigkeiten in *Large-Scale* Räumen schließen die Orientierung und die Navigation sowie die Schätzung von Distanzen und Richtungen ein. Die Vernachlässigung dieser räumlichen Fähigkeit beruht vor allem darauf, dass das Verhalten in einem Umgebungsraum nicht mit klassischen Papier- und Bleistift-Tests erfasst werden kann.

Noch nicht abschließend geklärt ist der Zusammenhang zwischen den räumlichen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum und den klassischen räumlichen Fähigkeiten. In einer früheren Arbeit untersuchten Thorndyke und Goldin (1983) das Überblickswissen über Los Angeles. Versuchspersonen mit gutem Überblickswissen schnitten besser ab in Tests zur räumlichen Veranschaulichung, zur räumlichen Orientierung und zum visuellen Gedächtnis. Malinowski (2001) korrelierte die Orientierungsleistung mit der Leistung in einem mentalen Rotationstest und fand dabei deutliche Zusammenhänge. Einen Überblick über Korrelationen zwischen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum und den klassischen räumlichen Fähigkeiten in verschiedenen Studien geben Hegarty und Waller (2005). Die Korrelationen liegen dabei meist unter $r = .2$ beziehungsweise etwas höher, wenn die *Large-Scale* Fähigkeiten in einer virtuellen Realität (siehe unten) erhoben wurden. Diese Ergebnisse deuten auf Zusammenhänge zwischen den klassischen räumlichen Fähigkeiten und den räumlichen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum hin oder wie es Quaiser-Pohl et. al (2004) ausdrück-

cken: „...both types of spatial cognition can be seen as two sides of the same coin“ (S. 104).

Im Gegensatz zu den klassischen räumlichen Fähigkeiten gibt es noch keine standardisierten Verfahren zur Testung der räumlichen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum. Ein geeignetes Medium stellen neben realen Umwelten vor allem virtuelle Umgebungen dar. Ziel der Erstellung einer virtuellen Umgebung ist unter anderem eine möglichst detailgetreue Abbildung der realen Umwelt, die möglichst realitätsnahe Erfahrung und die Interaktion mit der künstlichen Welt. Man unterscheidet dabei die *Desktop* virtuelle Realität von der *immersiven* virtuellen Realität. In der ersteren wird die künstliche Welt auf einem Computermonitor dargeboten, der dabei nicht das gesamte Gesichtsfeld ausfüllt. Visuelle Außenreize können somit nicht vollständig ausgeschaltet werden. Deshalb erweckt eine Desktop virtuelle Realität nicht den Eindruck, sich wirklich in der virtuellen Welt zu befinden, was dagegen eine immersive virtuelle Realität leistet. Dieser Eindruck wird in einer immersiven virtuellen Realität durch Ausblendung externer, realer Umweltreize erreicht (z.B. Rizzo, Wiederhold & Buckwalter, 1998). Das Eintauchen in eine immersive virtuelle Realität wird durch spezielle Ausgabegeräte wie das *Head Mounted Display* (HMD) ermöglicht.

Virtuelle Umgebungen haben sich heutzutage als Werkzeug zur Untersuchung und Rehabilitation von kognitiven Prozessen und körperlichen Beeinträchtigungen etabliert. Rizzo et al. (1998) fassen zusammen (S. 113):

The capacity of VR to create dynamic stimulus environments, in which all behavioral responding can be recorded, offers testing and training options that are not available using traditional psychological methods. Individuals who may benefit from these applications include persons with cognitive and functional impairments due to traumatic brain injury, neurological disorders, and learning disabilities.

Die virtuelle Realität wird besonders in der Raumkognitionsforschung eingesetzt. In zahlreichen Studien konnte gezeigt werden, dass virtuelle Welten ein adäquates Mittel sind, um kognitive Prozesse zu untersuchen (Jansen-Osmann & Fuchs, in press; Jansen-Osmann & Wiedenbauer, 2004a, 2004b, 2004c, 2006; Jansen-Osmann, Wieden-

bauer, Schmid & Heil, 2006). Ergebnisse von Studien in virtuellen Umgebungen spiegeln Ergebnisse von Studien in der realen Welt wider (Jansen-Osmann & Berendt, 2002, 2005; Waller, Hunt & Knapp, 1998).

Ruddle und Jones (2001) verglichen die manuelle Drehung von Holzfiguren in der realen Welt mit einer Drehung in der virtuellen Realität. Versuchspersonen trugen ein HMD und konnten mittels eines *Cyberprops* (spezielles Eingabegerät) die präsentierte Figur um alle Achsen drehen. Die manuelle Rotation in der virtuellen Realität glich dabei der Rotation in der realen Welt. Sie war jedoch etwas langsamer, was nicht auf die Rotationsgeschwindigkeit an sich zurückgeführt werden konnte, sondern auf längere Rotationsdistanzen. Die Versuchspersonen hatten Schwierigkeiten mit der Drehung in der virtuellen Realität um mehrere Achsen. Ein weiterer Unterschied war zu beobachten: Die Zeiten für die Feinabstimmung, also die genaue Einstellung der räumlichen Position, waren in der virtuellen Realität länger als in der realen Welt.

Virtuelle Welten bieten demnach die Möglichkeit, räumliche Fähigkeiten in einem Umgebungsraum valide zu untersuchen. Um zu einem umfassenden Bild räumlich-kognitiver Fähigkeiten zu kommen, müssen meiner Meinung nach sowohl die klassischen als auch die räumlichen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum erfasst werden, sowie es in den Vorarbeiten zu Experiment 4 für Kinder mit Spina bifida geschehen ist. Kinder mit Spina bifida sind eine Patientengruppe, die spezifische Einbußen in ihren räumlichen Fähigkeiten haben. Dies wird im nächsten Abschnitt deutlich.

1.1.3 Räumliche Fähigkeiten bei Patienten mit Spina bifida

Im Folgenden wird umfassend auf das Krankheitsbild Spina bifida eingegangen, da das in dieser Arbeit vorgestellte Trainingsprogramm der mentalen Rotation mit Spina bifida-Kindern angewandt wurde. Patienten mit Spina bifida wurden als Versuchspersonengruppe gewählt, da sie – neben der Krankheit an sich – an schwer beeinträchtigten räumlichen Fähigkeiten leiden. Ein räumlich-kognitives Training könnte diese Beeinträchtigungen zumindest teilweise kompensieren.

1.1.3.1 Das Krankheitsbild Spina bifida

Das Krankheitsbild Spina bifida (auch *Meningomyelocele* genannt) fällt unter die Neuralrohrdefekte. Diese Defekte manifestieren sich durch Verschlussstörungen des Neuralrohrs in der 3. bis 4. Schwangerschaftswoche. Die Inzidenz für Spina bifida liegt in Deutschland bei 0.06 - 0.1% (Jacobi, Preisler & Kieslich, 1998). Der Defekt des Rückenmarkskanals ist bei der Geburt nicht mit Haut bedeckt und die Rückenmarksnerven treten aus dem Rückenmarkskanal aus (diese Aussackung wird *Cele* genannt). Die austretenden Nerven sind nicht funktionsfähig. Die Cele wird operativ möglichst in den ersten 48 Stunden nach Geburt verschlossen. In Abbildung 2 ist der Defekt dargestellt.



Abbildung 2: Defekt des Rückenmarkskanals im Querschnitt (linke Abbildung) und in Obenaufsicht bei Geburt (rechte Abbildung). Die Abbildungen sind der Homepage der Arbeitsgemeinschaft für Spina bifida und Hydrocephalus (ASbH) entnommen (<http://www.paritaet.org/asbh/>).

Die Ursachen der Fehlbildung sind nicht bekannt, es gibt jedoch eine Reihe ätiologischer Risikofaktoren: Valproinsäure, Fieber in der Frühschwangerschaft, Zugehörigkeit zu bestimmten ethnischen Gruppen, erhöhtes Wiederholungsrisiko innerhalb einer Familie und die Erkrankung an bestimmten genetischen Syndromen. Folsäure dagegen wirkt präventiv, wobei ihre genaue Rolle beim Verschluss des Neuralrohrs noch ungeklärt ist (von Moers, 1998). Durch den Rückenmarksdefekt kommt es zu einer Beeinträchtigung des Liquorflusses, was erklärt, dass 80-90% der Spina bifida-Patienten auch an einem Hydrocephalus leiden. Beim Hydrocephalus kommt es zu einem erhöhten Gehirndruck und zur Vergrößerung der Gehirnventrikel, wobei der aufgestaute Liquor auf das umgebende Hirngewebe drückt. Um den Gehirndruck auf das normale Maß zurückzuführen, wird operativ mit Hilfe eines *Shunts*

(Schlauch-Ventil-System) ein Abfluss in die Bauchhöhle für den überschüssigen Liquor geschaffen.

Die Folge des Rückenmarksdefekts sind Lähmungen in den zu versorgenden Körperregionen sowie Funktionsstörungen des Darms (neuropathischer Darm) und der Harnblase (neurogene Blasensphinkter-Dysfunktion). Körperlähmungen betreffen dabei ausschließlich die unteren Extremitäten, wobei der Schweregrad von der Lokalisation des Defekts abhängt. In Abbildung 3 sind die Lähmungsniveaus illustriert. Patienten mit Lähmungen im sakralen Bereich können meist normal gehen, sie benötigen zum Großteil unterstützend eine Unterschenkelorthese. Diese Patienten erlernen jedoch in der frühen Kindheit zumeist verspätet das Laufen. Ab dem Lähmungsniveau L4 ist das Gehen stark beeinträchtigt. Patienten mit L4-Lähmungen benötigen eine Oberschenkelorthese, Patienten mit L3-Lähmungen können sich ohne beckenübergreifende Orthesen und Armstützen nicht aufrecht bewegen. Bei Patienten mit einer L2-Lähmung fehlen die Hüftbeuger und sie brauchen zur Stabilisierung der Hüfte, des Knies und des Sprunggelenkes Schienen mit Beckenteil und Armstützen. Häufig wird auf einen Rollstuhl zurückgegriffen. Ab Lähmungsniveau L1 kann das Gehen einzig durch die Benutzung einer Geh-Orthese mit hohem Beckenteil beziehungsweise einem Korsett bis zur Brust ermöglicht werden.

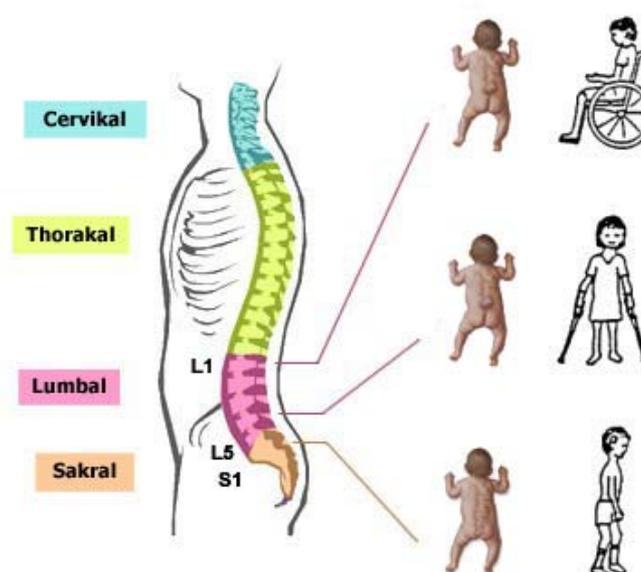


Abbildung 3: Lokalisation des Defekts und resultierende Lähmungsniveaus. Die Darstellung basiert auf einer Abbildung auf der Homepage der ASbH (<http://www.paritaet.org/asbh/>).

Die Muskellähmungen können außerdem zu Gelenkfehlstellungen und Verbiegungen der Wirbelsäule führen (Doll, 1998). Störungen des allgemeinen Wachstums und der Pubertätsentwicklung sind bei Kindern mit Spina bifida häufig; so sind die Patienten oft kleinwüchsig. 16-20% der Kinder erleben eine verfrühte Pubertät.

1.1.3.2 Allgemein-kognitive Entwicklung von Kindern mit Spina bifida

Kinder mit Spina bifida haben ein höheres Risiko kognitiver Minderleistungen. Untersuchungen mit dem Intelligenz- und Entwicklungstest *WISC* (Wechsler Intelligence Scale for Children, Wechsler, 1991) zeigten gemittelte Intelligenzwerte von 80 bis 92 (Casari & Fantino, 1998; Jacobs, Northam & Anderson, 2001; Shaffer, Friedrich, Shurtleff & Wolf, 1985; Tew, 1977; Wills, Holmbeck, Dillon & McLone, 1990), was einem Intelligenzquotienten (IQ) an der Grenze zwischen Normbereich (85-115) und leichter Lernbehinderung entspricht. In jeder dieser Studien fällt ein höherer Wert im Verbal- als im Handlungsteil auf.

Einen Einfluss auf die kognitive Entwicklung der Kinder scheinen die Komorbidität mit Hydrocephalus und das Lähmungsniveau zu haben. Casari und Fantino (1998) untersuchten den IQ in Abhängigkeit davon, ob die Kinder an einem shuntpflichtigen, nicht shuntpflichtigen (also weniger ausgeprägten) oder keinem Hydrocephalus litten. Dabei zeigte sich, dass sowohl der Verbal- als auch der Handlungs-IQ und somit auch der Gesamt-IQ bei Kindern mit shuntpflichtigem Hydrocephalus am niedrigsten ist. Zudem scheint das Lähmungsniveau die Intelligenz zu beeinflussen (Shaffer et al., 1985): Kinder mit Lähmungsniveau L2 schnitten schlechter ab als Kinder mit niedrigeren Lähmungsniveaus. Vor allem im Handlungsteil wurden die Defizite der Kinder mit höheren Lähmungsniveaus deutlich. Die inverse Beziehung von IQ und Lähmungshöhe konnte auch in anderen Studien bestätigt werden (Halliwell, Carr & Pearson, 1980; Lonton, 1977).

Neben Intelligenztestungen sind auch detailliertere Studien zu kognitiven Funktionen durchgeführt worden. Yeates, Enrile, Loss und Blumenstein (1995) untersuchten das verbale Gedächtnis. Spina bifida-Kinder erinnerten im ersten Lerndurchgang gleich viele Worte wie eine Gruppe gesunder Kinder, brauchten in den folgenden Durchgängen aber länger, um die Worte zu memorieren. Außerdem zeigten die Spi-

na bifida-Kinder einen ausgeprägten *Recency*-Effekt. Im *Delayed Recall* waren die Spina bifida-Kinder schlechter als die Kinder der Kontrollgruppe, nicht aber im Wiedererkennungstest. Andere Studien zeigten, dass Kinder mit Spina bifida über bessere Lese- als Rechenfertigkeiten verfügen (Halliwell et al., 1980; Shaffer et al., 1985; Spain, 1974).

1.1.3.3 Räumlich-kognitive Fähigkeiten von Spina bifida-Kindern

Erste Hinweise auf Defizite von Kindern mit Spina bifida im räumlich-kognitiven Bereich ergaben sich aus Intelligenzstudien, bei denen die IQ-Werte des Handlungsteils regelmäßig unter denen des sprachbezogenen Teils lagen (siehe oben). Im Handlungsteil werden neben dem logischen Schlussfolgern und der Arbeitsgeschwindigkeit auch räumliche Fähigkeiten getestet. Kinder mit Spina bifida haben besonders Probleme bei Unteraufgaben mit räumlichen Komponenten (Shaffer et al., 1985).

Spezifische Untersuchungen zu räumlich-kognitiven Fähigkeiten von Kindern mit Spina bifida gibt es nur wenige. Miller und Sethi (1971a; 1971b) untersuchten die Wahrnehmung visuell-räumlicher Beziehungen bei Kindern mit Hydrocephalus mit und ohne Spina bifida. Die erkrankten Kinder hatten eine sehr schlechte visuell-räumliche Wahrnehmung, die sich besonders in einer beeinträchtigten Figur-Grund-Unterscheidung äußerte. Auch in einem zweiten Experiment, in welchem tachistoskopisch dargebotene Hindi-Buchstaben gelernt wurden, war die Leistung der erkrankten Kinder schlechter als die der Kontrollgruppe. Die Befunde eines dritten Experiments verdeutlichten die geringe Leistungsfähigkeit von Kindern mit Hydrocephalus, irrelevantes Hintergrund-Material zu ignorieren. Auch in einer weiteren Studie zur Diagnose der visuell-räumlichen Wahrnehmung erreichten Kinder mit Spina bifida unterdurchschnittliche Werte (Sand, Taylor, Rawlings & Chitnis, 1973), wobei die größten Defizite in Aufgaben zur Augen-Hand-Koordination und zur Figur-Grund-Unterscheidung auftraten. Wills et al. (1990) führten einen Test durch, in dem die Spina bifida-Kinder eine Serie komplexer geometrischer Anordnungen zeichnerisch kopieren mussten. Die Werte lagen weit unter der Norm für gesunde Kinder. Außerdem führten sowohl ein höheres Lähmungsniveau als auch ein zusätzlicher Hydrocephalus mit Shunt zu geringeren Werten. Brookshire, Fletcher, Bohan

und Landry (1995) konnten bei Kindern mit Hydrocephalus zeigen, dass die visuell-räumlichen Schwierigkeiten unabhängig davon auftraten, ob die Aufgaben eine motorische Handlung verlangten oder nicht (Nachzeichnen geometrischer Figuren vs. Beurteilung einer Linienrichtung in einer Fächeranordnung von Linien).

In einer räumlichen Sequenz-Gedächtnisaufgabe fanden Mammarella, Cornoldi und Donadello (2003) keine Unterschiede zwischen Spina bifida-Kindern und einer Kontrollgruppe. In einem weiteren Test, der vor allem die visuelle Diskrimination und das visuelle Wiedererkennen erfasste, erzielten die erkrankten Kinder signifikant niedrigere Werte. In einer neueren Untersuchung wurde der Unterschied zwischen Kindern mit Spina bifida und Kontrollgruppenkindern in verschiedenen räumlichen Tests berechnet (Dennis, Fletcher, Rogers, Hetherington & Francis, 2002). Dabei stellte sich heraus, dass diese sehr viel größer bei aktionsbasierten (egozentrische mentale Rotation, multistabile Figuren, Figur-Grund-Unterscheidung, Zeichentest, Labyrinthtest aus dem *WISC*, Routenplanung) als bei objektbasierten (visuelle Illusionen, Gesichter wiedererkennen, Linienorientierung, Objektidentifikation) Aufgaben ausfielen.

Die einzige Studie, die die räumlichen Fähigkeiten von Patienten mit Spina bifida in einem *Large-Scale* Raum untersuchte, stammt von Simms (1987). Junge Erwachsene mit und ohne Spina bifida wurden in einem Auto durch zwei verschiedene Straßensysteme gefahren. Direkt im Anschluss sollten die Versuchspersonen den Fahrer durch dasselbe Straßensystem dirigieren. Dabei begingen die Patienten mit Spina bifida deutlich mehr Fehler als die gesunden Versuchspersonen. Auch beim anschließenden Einzeichnen der Route in einer Überblickskarte schnitt die Patientengruppe schlechter ab. Während die Leistung beim Wiederfinden der Routen nicht mit zusätzlich erhobenen kognitiven Tests korrelierte, konnte eine enge Beziehung zwischen dem Einzeichnen der Route und sowohl den Tests „Bilderordnen“ als auch „Muster kopieren“ gefunden werden. In der Gruppe der Patienten mit Spina bifida befanden sich Patienten, denen es mit Gehhilfen möglich war, zu laufen. Diese schnitten genauso gut ab wie die gesunde Kontrollgruppe, was auf zweierlei Faktoren beruhen kann: größere Umwelterfahrung oder niedrigeres Lähmungsniveau.

Kinder mit Spina bifida scheinen demnach über schwer beeinträchtigte räumliche Fähigkeiten zu verfügen. Die wenigen vorhandenen Studien in diesem Bereich erfassen jedoch unsystematisch Teilgebiete der räumlichen Fähigkeiten. So gibt es bisher keine Studie, die die mentale Rotationsfähigkeit dieser Kinder umfassend untersucht. Auch die Gründe der Defizite bleiben im Dunkeln. Man könnte annehmen, dass aufgrund der körperlichen Behinderung die frühkindliche Raumerfahrung eingeschränkt war, was zur Ausbildung der Defizite führte. Studien mit gesunden Kindern geben Hinweise darauf, dass frühe Raumerfahrung essentiell für die Entwicklung räumlicher Fähigkeiten ist (z.B. Neidhardt & Schmitz, 2001; Yan, Thomas & Downing, 1998): Wenn die Einschränkung der Raumerfahrung Grundlage der Defizite sein sollte, dann sollte es möglich sein, diese Defizite durch ein räumliches Training zumindest teilweise zu kompensieren.

1.1.3.4 Trainierbarkeit der räumlichen Fähigkeiten von Kindern mit körperlichen Beeinträchtigungen

Während es keine Studien zum Training der räumlichen Fähigkeiten von Kindern mit Spina bifida gibt, wurden Studien zum Training der räumlichen Fähigkeiten in virtuellen Räumen mit körperlich behinderten Kindern durchgeführt (Foreman, Stanton, Wilson & Duffy, 2003; Stanton, Wilson & Foreman, 2002; Wilson, Foreman, Stanton & Duffy, 2004). Wilson et al. (2004) erfassten das räumliche Gedächtnis für Landmarken in einem virtuellen dreistöckigen Gebäude. Nach einer Trainingsphase mussten körperbehinderte und gesunde Kinder Richtungen zu den einzelnen Landmarken schätzen. Alle Kinder hatten große Schwierigkeiten, wenn sie Richtungen zu Landmarken schätzen sollten, die sich auf einem anderen Stockwerk befanden als sie selbst. Es konnten keine Unterschiede in der Schätzgenauigkeit zwischen den beiden Gruppen gefunden werden. In der Studie von Stanton et al. (2002) wurde das räumliche Verhalten von behinderten Kindern in einem virtuellen Labyrinth untersucht und trainiert. Unter den 34 körperlich behinderten Kindern waren auch fünf mit Spina bifida. Erfasst wurde nach einer Explorations- und einer Trainingsphase im Labyrinth die Wahl von Abkürzungen. Dabei schnitten gesunde Kontrollkinder besser ab. Außerdem schnitten die Kinder am schlechtesten ab, die schon in der frühen Kindheit in ihrer Bewegungsfähigkeit eingeschränkt waren.

Meines Wissens nach wurde noch nie ein mentales Rotationstraining mit körperlich beeinträchtigten Kindern oder Erwachsenen durchgeführt. Ein solches Training wurde in der vorliegenden Arbeit entwickelt und evaluiert. Bevor auf Studien zum Training der mentalen Rotation mit gesunden Versuchspersonen eingegangen wird, wird eine umfassende Einführung in das Paradigma der mentalen Rotation gegeben. Während bei der Diagnostik der klassischen räumlichen Fähigkeiten meist Papier- und Bleistift-Tests der mentalen Rotation eingesetzt werden, werden des Weiteren vor allem Studien vorgestellt, die mit chronometrischen Verfahren arbeiten.

1.2 Das Paradigma der mentalen Rotation

Roger N. Shepard und Jacqueline Metzler (1971) präsentierten ihren Versuchspersonen einfache Strichzeichnungen dreidimensionaler Figuren. Diese waren aus zehn Würfeln zusammengesetzt und bestanden aus vier Armen. Die paarweise nebeneinander präsentierten Würfelfiguren konnten entweder identisch sein oder eine Würfelfigur war eine gespiegelte Version der anderen. Eine der beiden Figuren war entweder in der Bildebene oder in der Bildtiefe gedreht (siehe Abbildung 4), wobei die Winkeldisparität zwischen den Figuren systematisch in 20°-Intervallen variiert wurde.

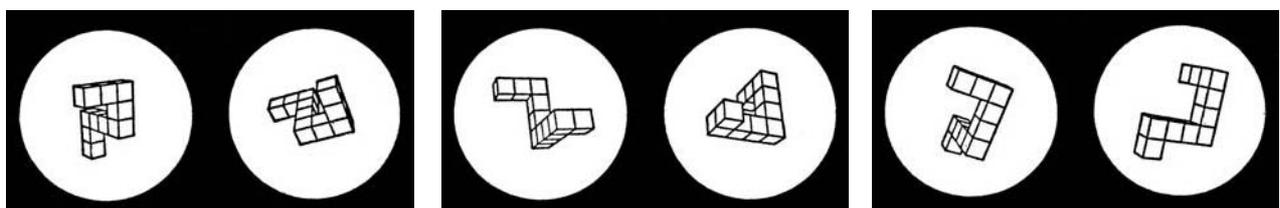


Abbildung 4: Würfelfiguren der Shepard und Metzler-Studie (1971). Die Figuren unterschieden sich entweder in der Bildebene (linke Abbildung) oder in der Bildtiefe (mittlere Abbildung) und waren dabei identisch (linke und mittlere Abbildung) oder gespiegelt (rechte Abbildung). Abbildungen entnommen aus Shepard und Metzler (1971).

Aufgabe der acht Versuchspersonen war es, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu entscheiden, ob es sich um identische oder gespiegelte Versionen handelte. Es wur-

den 1600 Würfelfigurenpaare präsentiert. Dabei wurden die Reaktionszeit bis zur Entscheidung und die Anzahl der Fehler erfasst. Shepard und Metzler (1971) konnten zeigen, dass die Reaktionszeiten mit steigender Winkeldisparität linear anstiegen, wobei sich kein Unterschied zwischen einer Rotation in der Bildebene und der Bildtiefe zeigte (siehe Abbildung 5). Die Zunahme der Winkeldisparität bedingte demnach eine konstante Erhöhung der Reaktionszeit. Die Fehlerrate lag bei 3.2%, wobei die Autoren keine Fehlerraten in Abhängigkeit von der Winkeldisparität angaben.

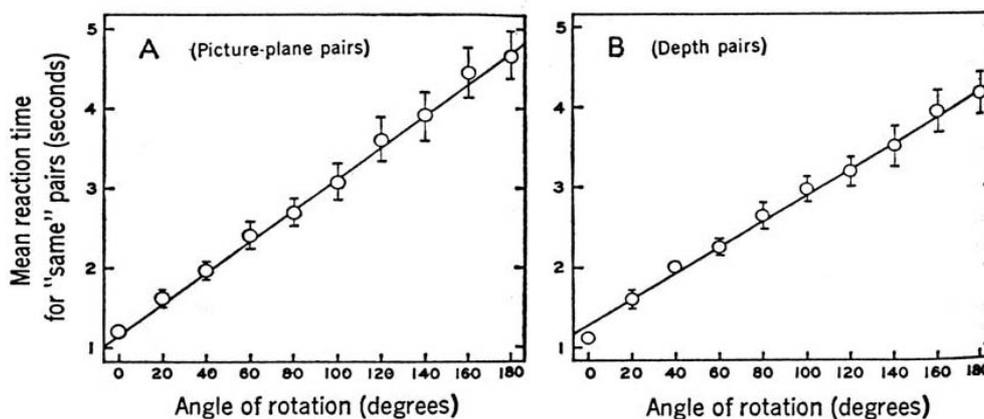


Abbildung 5: Ergebnisse der Shepard und Metzler-Studie (1971) für Rotationen in der Bildebene (linke Abbildung) und der Bildtiefe (rechte Abbildung). Fehlerbalken illustrieren Standardfehler des Mittelwerts. Abbildungen entnommen aus Shepard und Metzler (1971).

Aufgrund dieser Ergebnisse schlossen Shepard und Metzler (1971), dass die Versuchspersonen die Figuren mental rotiert hatten, um zur „identisch“/„gespiegelt“-Entscheidung zu gelangen. Dieser postulierte mentale Prozess beinhaltet die vorgestellte Drehung einer der beiden Figuren in die räumliche Lage der anderen Figur und einen Vergleichsprozess, wobei angenommen wurde, dass die mentale Rotation ein internes Analogon einer externalen Rotation ist (Metzler & Shepard, 1982).

Aufgrund der systematischen Variation der Winkeldisparität und der linearen Beziehung zur Reaktionszeit kann in Studien zur mentalen Rotation eine Regressionsgerade (im Weiteren auch „mentale Rotationsfunktion“ genannt) errechnet und der Achsenabschnitt sowie die Steigung der Funktion angegeben werden. Cooper und Shepard (1973) postulierten, dass der Achsenabschnitt und die Steigung verschiedene kognitive Prozesse der mentalen Rotation abbilden. Sie nahmen vier aufeinander

folgende Prozesse an: Stimuluskodierung, mentale Rotation, Vergleich und motorische Reaktion. Heil und Rolke (2002) konnten mittels einer elektrophysiologischen Studie bestätigen, dass diese Prozesse sequentiell ablaufen. Aus der Unabhängigkeit dieser Prozesse folgerten Cooper und Shepard, dass nur der Prozess der mentalen Rotation von der Winkeldisparität beeinflusst werden sollte. Während die Steigung der mentalen Rotationsfunktion somit den Rotationsprozess an sich indizieren sollte, sollte der Achsenabschnitt die drei anderen Prozesse umfassen (siehe auch Kail, Pellegrino & Carter, 1980). In der Studie von Shepard und Metzler (1971) lag die mentale Rotationsgeschwindigkeit – als invertierter Wert der Steigung – sowohl in der Bildebene als auch in der Bildtiefe bei etwa 60°/s. Die annähernd gleiche Geschwindigkeit bei Drehung um verschiedene Achsen ist verwunderlich, wenn man bedenkt, wie sich die Ansicht der Figuren ändert (siehe Abbildung 4): Bei der Rotation in der Bildebene bleibt der visuelle Reiz an sich gleich, die Drehung der dreidimensionalen Figur ist identisch mit der Drehung eines zweidimensionalen Bildes. Bei der Rotation in der Bildtiefe jedoch ändert sich der visuelle Reiz. Würfel, die sichtbar waren, werden nun durch andere verdeckt und zuvor verdeckte werden sichtbar. Dieser Befund zeigt, dass die Figuren – egal ob in der Bildebene oder -tiefe gedreht – wie reale Objekte dreidimensional verarbeitet werden: Ein einfacher Merkmalsvergleich einzelner Würfel reicht bei der Rotation in der Bildtiefe nicht aus, um zur „identisch“/„gespiegelt“-Entscheidung zu gelangen.

In den folgenden Abschnitten wird eine Zusammenfassung wichtiger Fragestellungen zur mentalen Rotation erstellt, die aus den Ergebnissen der Shepard und Metzler-Studie folgen. Eine Reihe von Studien werden zu den einzelnen Fragestellungen vorgestellt.

1.2.1 Einfluss unterschiedlichen Stimulusmaterials

Das Paradigma der mentalen Rotation wurde bis heute mit verschiedenen Stimuli untersucht. Abhängig von den verwendeten Stimuli zeigten sich unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Reaktionszeiten. Shepard und Metzler (1971) benutzten in ihrer klassischen Studie dreidimensionale Würfelfiguren (siehe Abbildung 4). Lynn Cooper war die erste, die das Paradigma der mentalen Rotation systematisch

mit zweidimensionalem Stimulusmaterial untersuchte, und zwar mit alphanumerischen Zeichen (Cooper & Shepard, 1973) sowie mit abstrakten Polygonen (Cooper, 1975). Die alphanumerischen Zeichen wurden einzeln präsentiert und Versuchspersonen sollten entscheiden, ob es sich um normale oder gespiegelte Versionen handelte. Durch die Präsentation eines einzelnen Stimulus wird dieser mit einer im Langzeitgedächtnis gespeicherten Version verglichen. Es zeigte sich ein monotoner Anstieg der Reaktionszeiten mit steigender Disparität von der aufrechten Position. Die Rotationsgeschwindigkeit betrug etwa $330^\circ/\text{s}$ und war damit knapp sechsmal höher als in der Studie von Shepard und Metzler mit dreidimensionalen Würfelfiguren. Cooper (1975) variierte die Komplexität der zweidimensionalen Polygone, um – unter anderem – den Einfluss auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit genauer zu untersuchen. Es zeigte sich eine ansteigende mentale Rotationsfunktion über alle Polygone hinweg, wobei die Rotationsgeschwindigkeit etwa $460^\circ/\text{s}$ betrug. Die Komplexität hatte keinen systematischen Einfluss auf die Geschwindigkeit der mentalen Rotation. Dieser Studie zufolge scheint die mentale Rotation nicht schwieriger zu sein für komplexes zweidimensionales Stimulusmaterial; in anderen Studien beeinflusste die Komplexität jedoch die Rotationszeiten (siehe nächster Abschnitt). Seit den Studien von Cooper wurden viele Studien mit zweidimensionalem Stimulusmaterial durchgeführt (Corballis, 1986; Jolicoeur & Cavanagh, 1992; Kail et al., 1980; Marmor, 1975, 1977; Roberts & Bell, 2000b).

Shepard und Metzler (1988) untersuchten den Einfluss von unterschiedlichem Stimulusmaterial (drei- vs. zweidimensional) sowie vom Aufgabentyp (Präsentation eines Stimulus vs. zweier Stimuli). Es zeigte sich, dass die Rotationsgeschwindigkeit bei nur einem Stimulus etwa dreimal höher war als bei der Aufgabe mit zwei Stimuli (vgl. Steiger & Yuille, 1983) und dass sich die Rotationsgeschwindigkeit nicht zwischen zwei- und dreidimensionalen Objekten unterschied (während der Achsenabschnitt der mentalen Rotationsfunktion für zweidimensionale Objekte geringer war). Zudem war die Fehlerrate in der Aufgabe mit zwei Stimuli etwa doppelt so hoch wie in der Aufgabe mit einem Stimulus. Die Ergebnisse legen nahe, dass es schwieriger ist, ein zu rotierendes Objekt mit einem zweiten external präsentierten Objekt als mit einem internal repräsentierten zu vergleichen. Shepard und Metzler (1988) vermutete-

ten, dass im ersten Fall fortwährend Vergleichsprozesse mit dem zweiten Objekt durchlaufen werden, was Zeit kostet und langsamere Rotationsgeschwindigkeiten sowie höhere Fehlerraten erklärt. Andere Studien bestätigen diese Annahme (Just & Carpenter, 1976; Steiger & Yuille, 1983). Zudem scheinen überlernte Symbole am schnellsten mental rotiert zu werden, was Studien mit Buchstaben und Zahlen im Vergleich zu abstrakten Symbolen zeigen (z.B. Cooper & Shepard, 1982; Jordan, Wuestenberg, Heinze, Peters & Jaencke, 2002; Kail et al., 1980).

Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse drängt sich die Frage auf, wie Versuchspersonen einzelne Stimuli mental rotieren. Wird bei der mentalen Rotation eines Stimulus dieser in Einzelteile aufgegliedert und diese einzeln rotiert (analytische Rotation) oder wird der Stimulus als Ganzes rotiert (holistische Rotation)?

1.2.2 Holistische und analytische Verarbeitung bei der mentalen Rotation

Kontrovers wurde und wird diskutiert, ob die mentale Repräsentation ein isomorphes Abbild des zu rotierenden Objektes ist und die mentale Rotation damit einer physikalischen Drehung entspricht. Einige Studien sprechen für diese holistische Verarbeitung (z.B. Bethell-Fox & Shepard, 1988; Cooper & Shepard, 1982; Kosslyn, 1981). So schreiben Cooper und Shepard (1982; S. 118):

Mental rotation is an analog process with a serial structure bearing a one-to-one relationship to the corresponding physical rotation. The time required (mentally) to rotate from an orientation A to an orientation C is just the sum of the times required to rotate from A to some intermediate orientation B, and to rotate from B to C.

Eine Blickbewegungsstudie von Just und Carpenters (1976) lässt jedoch eher auf einen analytischen Prozess schließen: Das Objekt wird mental in einzelne Segmente zerlegt und die Repräsentationen dieser Segmente werden einzeln rotiert. Eine interessante Studie zur Klärung dieser Frage führten Yuille und Steiger (1982) durch. Sie machten sich den Umstand zu Nutze, dass bei der mentalen Rotation der Shepard und Metzler-Würfelfiguren in der Bildtiefe die Repräsentation des unteren Teils der Figur ausreicht, um die „identisch“/„gespiegelt“-Entscheidung zu treffen. Ihre An-

nahme war, dass die Aufklärung der Versuchspersonen über diesen Umstand bei einer analytischen Verarbeitung zu einer Verkürzung der Reaktionszeiten führen sollte. Tatsächlich führte die Induktion dieser Strategie zu einer deutlich schnelleren Rotationsgeschwindigkeit (Experiment 1). In weiteren Experimenten (Experimente 2-4) konnte zudem gezeigt werden, dass bei höherer Komplexität der Würfel- und Armanzfiguren (manipuliert über höhere Würfel- und Armanzahl) die Rotationsgeschwindigkeit geringer ist. Dieser Komplexitätseffekt dürfte bei einer holistischen Strategie nicht auftreten. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Pylyshyn (1979) mit zweidimensionalen Strichzeichnungen; die oben beschriebene Studie von Cooper (1975) erbrachte dagegen gegensätzliche Ergebnisse.

Einer Studie von Bethell-Fox und Shepard (1988) lag die Annahme zu Grunde, dass der Grad, zu dem die mentale Rotationsgeschwindigkeit unabhängig von der Stimuluskomplexität ist, von dem Grad abhängt, zu dem die Stimuli holistisch verarbeitet werden. Stimuli waren hier schachbrettartige Matrizen. Die Versuchspersonen bearbeiteten acht Blöcke à 36 Durchgänge, in denen nur zwei Matrizen – eine einfache und eine komplexe – präsentiert wurden. In zwei nachfolgenden Testblöcken wurden außer den beiden gelernten Matrizen sechs neue vorgegeben. Trotz anfänglich längeren Reaktionszeiten für komplexe Stimuli unterschieden sich die Reaktionszeiten in den Testblöcken nicht mehr zwischen einfachen und komplexen Stimuli. Die Versuchspersonen brauchten dagegen länger für die neuen Matrizen (zum Einfluss des Trainings auf ungelernete Stimuli siehe Abschnitt 1.4.2). Dasselbe Bild ergab sich auch für die Steigungen der mentalen Rotationsfunktionen. Aus diesen Ergebnissen schlossen Bethell-Fox und Shepard, dass durch die Übung ganzheitliche Repräsentationen der präsentierten Stimuli gebildet wurden, die holistisch rotiert wurden, und somit die Komplexität keine Rolle mehr spielt. So könnte auch erklärt werden, warum Cooper (1975) keinen Einfluss der Komplexität auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit fand. Die heterogene Datenlage lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass einfachere Reize holistisch, komplexere Reize hingegen analytisch oder Stück für Stück gedreht werden, verbunden mit einer Zunahme an visuell-räumlichen Kontroll- und Rekonstruktionsprozessen mit steigender Komplexität (Just & Carpenter, 1985).

Wenn man von einem analogen Prozess der mentalen Rotation ausgeht, der einer physikalischen Rotation gleicht, sollte es Zusammenhänge zwischen einer perzeptuellen – real wahrgenommenen – und einer mentalen Rotation geben. Dazu gibt es nur wenige Befunde, wie im nächsten Abschnitt ersichtlich wird.

1.2.3 Zusammenhang zwischen perzeptueller und mentaler Rotation

Es lässt sich fragen, ob es einen Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung realer Rotationsbewegungen und der mentalen Rotation gibt. Dazu führten Corballis und McLaren (1982) eine Studie durch, in der Versuchspersonen direkt vor der Ausführung einer mentalen Rotation auf eine drehende Scheibe blickten. Durch die drehende Scheibe wurde ein Bewegungsnacheffekt ausgelöst, das heißt, die mental zu rotierenden Buchstaben schienen sich zu drehen (in die entgegengesetzte Richtung der Scheibendrehung). Waren die Richtungen des Nacheffektes und der mentalen Rotation inkongruent, waren die Reaktionszeiten der mentalen Rotation verlängert. Die erhöhte Reaktionszeit beruhte nicht darauf, dass die Position der Buchstaben verändert wahrgenommen wurde. Die perzeptuelle Bewegung interferiert demnach mit der vorgestellten. Diese Studie konnte von Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (1997) erfolgreich repliziert werden. Sie konnten zudem zeigen, dass die Verlangsamung tatsächlich durch die Interferenz ausgelöst wurde und nicht durch einen Richtungswechsel der mentalen Rotation. Ähnliche Ergebnisse stammen aus einer Studie von Jolicoeur und Cavanagh (1992), in der die Stimuli sich während der Präsentation bewegten. Im Vergleich zu einer neutralen Bedingung brauchten die Versuchspersonen mehr Zeit für eine mentale Rotation, wenn der Stimulus sich in die entgegengesetzte Richtung bewegte und weniger Zeit, wenn die Richtungen kongruent waren. Die Drehung des Hintergrunds hatte dagegen keinen Einfluss auf die Reaktionszeit.

Podzebenko, Egan und Watson (2005) führten eine bildgebende Studie durch, in der die Versuchspersonen Buchstaben mental rotierten oder die Rotation auf einem Bildschirm verfolgten. Dabei fand sich für beide Aufgaben in den gleichen kortikalen Arealen – zumeist parietal – eine erhöhte Aktivierung, was den engen Zusammen-

hang zwischen einer perzeptuellen Wahrnehmung und einer mentalen Repräsentation auch auf kortikaler Ebene verdeutlicht.

Es bestehen demnach enge Zusammenhänge zwischen der mentalen Rotation und der perzeptuellen Wahrnehmung. Daneben lässt sich auch die Aktivierung motorischer Prozesse bei der mentalen Rotation vermuten. Im Weiteren werden Studien vorgestellt, die untersuchen, ob motorische Handlungen mit der Ausführung einer mentalen Rotation im Zusammenhang stehen.

1.2.4 Beteiligung motorischer Prozesse bei der mentalen Rotation

Bei der mentalen Rotation scheinen zwei Strategien miteinander verbunden zu sein, nämlich eine motorische, externale und eine mentale, internale Strategie. Wexler, Kosslyn und Berthoz (1998) gingen davon aus, dass bei der mentalen Rotation ein Handlungsplan erstellt wird, der aber nicht offen ausgeführt wird. So entsteht eine Simulation des perzeptuellen Ergebnisses. Aus dieser Annahme leiteten Wexler et al. ab, dass die Ausführung einer mentalen Rotation von einer gleichzeitigen motorischen Rotation gestört werden sollte, was sie mit Hilfe eines Interferenzparadigmas untersuchten. Ihre Versuchspersonen lernten mittels eines Joysticks manuelle Rotationen in zwei Geschwindigkeiten ($45^\circ/s$ und $90^\circ/s$) auszuführen. Nach dieser Lernphase wurden während der manuellen Rotation zweidimensionale Stimuli präsentiert, die mental rotiert werden sollten. Eine Versuchsgruppe hatte dabei in einem ersten Block die langsamen und danach die schnellen motorischen Rotationen auszuführen, eine zweite Gruppe umgekehrt. Alle Teilnehmer waren in der mentalen Rotation schneller, wenn die Rotationsrichtungen kompatibel waren, also die mentale Rotation in die gleiche Richtung verlangt wurde wie die motorische. Dagegen interferierte die motorische Rotation in inkompatiblen Durchgängen; die Reaktionszeiten der mentalen Rotation waren in diesen Fällen langsamer. Es zeigte sich zudem ein Einfluss der motorischen Geschwindigkeit: Bei der langsamen motorischen Rotation sank die Reaktionszeitdifferenz zwischen kompatiblen und inkompatiblen Rotationen je höher die Winkeldisparität der mentalen Rotation war, während sie bei der schnellen motorischen Rotation stieg. Dies werteten die Autoren als ersten Hinweis

auf eine Interaktion zwischen der motorischen und der mentalen Rotationsgeschwindigkeit. Noch deutlicher zeigte sich der Zusammenhang zwischen mentaler und motorischer Rotation beim Vergleich der Reaktionszeiten im ersten und zweiten Block zwischen den beiden Versuchsgruppen. Während die Gruppe, die erst die langsamen und danach die schnellen motorischen Rotationen ausführte, auch in der mentalen Rotation sehr viel schneller wurde, sanken die Reaktionszeiten für die Gruppe, die als zweites die langsamen motorischen Rotationen durchführte. Interessanterweise zeigte sich im ersten Block ein stärkerer Zusammenhang zwischen der mentalen und motorischen Rotation als im zweiten Block. Das könnte darauf beruhen, dass im zweiten Block gedächtnisbasierte Prozesse eine Rolle spielten (worauf auch die insgesamt niedrigeren Reaktionszeiten im zweiten Block hinweisen). Alternativ (oder zusätzlich) kann die motorische Rotation sich so weit automatisiert haben, dass sie im zweiten Block die mentale Rotation nicht mehr so stark wie anfangs beeinflusste.

Eine ähnliche Studie führten Wohlschläger und Wohlschläger (1998) zur Bestätigung ihrer *Common Processing* Hypothese durch. Diese besagt, dass es einen gemeinsamen Prozess gibt, der bei der manuellen Rotation durch motorische Befehle Kontrolle ausübt und bei der mentalen Rotation die Änderung der visuell-räumlichen Repräsentation kontrolliert. In einem ersten Experiment, in dem Versuchspersonen entweder eine mentale oder eine motorische Rotation ausführen sollten, konnten sie zeigen, dass sich die Reaktionszeiten bei der mentalen und manuellen Rotation gleichen. Beide stiegen mit steigender Winkeldisparität an und beide wurden in gleicher Art von der Rotationsachse beeinflusst: Reaktionszeiten für die mentale genauso wie für die manuelle Rotation waren etwas länger bei Rotationen in der Bildebene als in der Bildtiefe. In einem zweiten Experiment führten Versuchspersonen gleichzeitig eine mentale Rotation in der Bildebene und eine Handbewegung aus, wobei die Handbewegung entweder eine Rotation in der Bildebene beziehungsweise in der Bildtiefe oder eine Translationsbewegung war. Nur die gleichzeitige Ausführung der motorischen Rotation in der Bildebene interferierte mit der mentalen Rotation. Die Reaktionszeiten der mentalen Rotation waren in diesem Fall höher, wenn die geforderte Richtung der manuellen Rotation inkompatibel war. Eine gleichzeitige motori-

sche Rotation in der Bildtiefe oder eine Translationsbewegung hatte dagegen keinerlei Einfluss auf die Ausführung der mentalen Rotation. Der Zusammenhang zwischen der mentalen und der manuellen Rotation bei Drehung um dieselbe Achse war dabei bidirektional: Bei kompatiblen Durchgängen war die motorische Geschwindigkeit schneller als bei inkompatiblen. Außerdem wurde in inkompatiblen Durchgängen häufiger in die „falsche“ Richtung (im Sinne von längerem Weg) rotiert. Wohlschläger und Wohlschläger sahen diese Ergebnisse als Bestätigung ihrer *Common Processing* Hypothese an und vermuteten, dass die Interaktion zwischen mentaler und motorischer Rotation auf der Ebene der Handlungsplanung ihren Ursprung hat. Diese Annahme konnte in einer späteren Studie belegt werden, in der Wohlschläger (2001) zeigen konnte, dass die bloße Planung einer motorischen Handlung ausreicht, um die Ausführung einer mentalen Rotation zu beeinflussen. Die Versuchspersonen sollten eine Handbewegung planen und diese erst nach der Bearbeitung einer mentalen Rotation ausführen. Die Planung einer Handbewegung in eine mit der mentalen Rotation inkompatible Richtung führte dabei zu einer Verlangsamung der Reaktionszeiten in der mentalen Rotationsaufgabe. In einem zweiten Experiment konnte gezeigt werden, dass diese Interferenz auch dann auftrat, wenn die manuelle Rotation nicht ausgeführt wurde.

Auch andere Studien deuten auf motorische Prozesse bei der mentalen Rotation hin. Schwartz und Holton (2000) zum Beispiel konnten bestätigen, dass eine motorische Handlung die Vorstellung einer Rotation erleichterte: Versuchspersonen, die eine reale Würfelfigur manuell rotierten, waren schneller in der Vorstellung einer Rotation als Versuchspersonen, die den Rotationsprozess mental durchführten. In drei Experimenten konnten die Autoren zudem zeigen, dass die Versuchspersonen bei der Vorstellung von Objekten in verschiedenen Winkelstellungen von Bewegungen der eigenen Hand beeinflusst wurden. In einer Studie von Sekiyama (1982) wurde bei der mentalen Rotation von Hand-Bildern zwar eine mentale Rotationsfunktion gefunden, diese war jedoch systematisch verschoben: Die Reaktionszeiten wurden nicht nur von der Winkeldisparität, sondern auch von der Ausführbarkeit einer Handbewegung beeinflusst. Mentale Rotationen von Handstellungen, die physikalisch kaum möglich waren, dauerten länger. Ähnliche Ergebnisse fanden Petit und

Harris (2005). In einer neueren Studie konnte gezeigt werden, dass Patienten, die an Handdystonien litten, in einer mentalen Rotationsaufgabe mit Hand-Fotografien deutlich schlechter abschnitten als eine Kontrollgruppe (Fiorio, 2005). Bei der mentalen Repräsentation einer Handstellung der eigenen Hand scheinen Motorprozesse involviert zu sein, die eine tatsächliche Handrotation simulieren. So beeinflusste die eigene Handstellung die mentale Repräsentation einer Hand (Sirigu & Duhamel, 2001).

Zwei aktuelle Studien untersuchten auch bei Kindern den Zusammenhang zwischen motorischer und mentaler Rotation (Frick, Daum, Walser & Mast, 2005; Funk, Brugger & Wilkening, 2005). In der Untersuchung von Frick et al. führten Fünfjährige, Achtjährige, Elfjährige und Erwachsene simultan motorische Handrotationen und mentale Rotationen durch. Die manuellen Rotationen wurden anhand eines Rads, an dem ein Handgriff angebracht war, durchgeführt. Die mentale Rotationsaufgabe mit zweidimensionalen Stimuli konnte dabei kompatibel oder inkompatibel mit der Drehrichtung der manuellen Rotation sein. Die Reaktionszeiten der mentalen Rotation stiegen für alle Altersgruppen mit steigender Winkeldisparität an, wobei jüngere Kinder langsamer waren als ältere. Gemittelt über alle Altersgruppen hatte die Richtung der manuellen Rotation einen Einfluss auf die mentale Rotation: Die Reaktionszeiten in kompatiblen Rotationen waren kürzer als in inkompatiblen. Bei der getrennten Analyse der Altersgruppen ergaben sich nur für die Fünf- und Achtjährigen bedeutsame Unterschiede zwischen kompatiblen und inkompatiblen Rotationen. Die Autoren vermuteten, dass es mit steigendem Alter den Kindern eher gelingt, mentale Prozesse von motorischen zu entkoppeln.

Mit sechsjährigen Kindern und Erwachsenen untersuchten Funk et al. (2005) die mentale Rotation von Handfotografien, auf denen entweder Handrücken oder Handinnenflächen zu sehen waren. Zur Entscheidung, ob eine linke oder eine rechte Hand zu sehen war, bedienten die Versuchspersonen eine Tastatur, die sie entweder von oben (wobei die eigenen Handrücken oben waren) oder von unten (eigene Handinnenfläche oben) drücken konnten. Dabei muss betont werden, dass die Sicht auf die eigenen Hände versperrt war. Waren die mental zu rotierenden Hände mit dem Handrücken nach oben präsentiert, waren alle Versuchspersonen schneller, wenn die

eigene Handstellung dazu kongruent war als wenn die Innenfläche der eigenen Hand nach oben zeigte. Während die eigene Handstellung bei Erwachsenen keine Rolle spielte, wenn Bilder von Handinnenflächen gezeigt wurden, profitierten die Kinder von einer kongruenten eigenen Handstellung. Die mentale Rotationsgeschwindigkeit sowohl der Erwachsenen als auch der Kinder wurde demnach von der eigenen Handstellung beeinflusst, die der Kinder zu einem höheren Maße. Zusätzlich wurden mentale Rotationen schneller bearbeitet, wenn Handstellungen präsentiert wurden, die mit den eigenen Händen ausführbar waren. Funk et al. sehen ihre Ergebnisse als Beleg für die Beteiligung motorischer Prozesse bei der mentalen Rotation, die bei Kindern sogar noch ausgeprägter zu sein scheint als bei Erwachsenen. In einer Studie von Wilson, Maruff, Butson, Williams, Lum und Thomas (2004) wurde die mentale Rotation von Kindern mit Koordinationsstörungen untersucht. Als Basis dieser Störung wird eine Beeinträchtigung von motorischen Repräsentationen vermutet. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe zeigten die Kinder mit Koordinationsstörungen einen sehr viel geringeren Zusammenhang zwischen Reaktionszeiten und der Winkeldisparität bei der mentalen Rotation von Händen. Die Autoren vermuten, dass diese Ergebnisse die geringen Fähigkeiten dieser Kinder widerspiegeln, motorische Prozesse bei der mentalen Rotation zu nutzen.

In den letzten Jahren wurde die mentale Rotation bei Erwachsenen zunehmend mithilfe bildgebender Verfahren untersucht. Parsons, Fox, Downs und Glass (1995) setzten die Positronen-Emissionstomographie (PET) ein und fanden bei der mentalen Rotation von Händen eine Aktivierung des supplementären Motorkortex und der superioren prämotorischen Areale. In einer ähnlichen Studie konnten auch Kosslyn, DiGirolamo, Thompson und Alpert (1998) eine Aktivierung des Motorkortex und des prämotorischen Kortex feststellen. Cohen, Kosslyn, Breiter und DiGirolamo (1996) konnten mittels funktioneller Magnetresonanztomographie zeigen, dass die Aktivierung von motorischen und prämotorischen Arealen bei der mentalen Rotation – zumindest bei der Hälfte ihrer Versuchspersonen – nicht auf die Präsentation von Händen oder anderen Körperteilen beschränkt ist, sondern auch bei dreidimensionalen Würfelfiguren zu beobachten ist. Auch andere Studien belegen die Aktivierung von motorischen Arealen bei der mentalen Transformation von nicht körperbezogenen

Stimuli (Barnes et al., 2000; Kosslyn, Thompson, Wraga & Alpert, 2001; Richter et al., 2000). Ganis, Keenan, Kosslyn und Pascual-Leone (2000) störten den primären motorischen Kortex durch transkraniale Magnetstimulation in seiner Funktion, was zu längeren Reaktionszeiten bei der mentalen Rotation von Hand-Bildern führte. Eine vergleichende Studie mit mentalen Hand- und Objektrotationen führten Wraga, Thompson, Alpert und Kosslyn (2003) durch. Ihre Versuchsteilnehmer führten entweder zwei Blöcke mentaler Rotationen von Würfelfiguren (Objekt-Objektgruppe) aus oder einen Block mentaler Handrotationen und anschließend einen Block mentaler Objektrotationen (Hand-Objektgruppe). Während bei der Objektrotation mittels PET keine Aktivierung von motorischen Arealen gefunden werden konnte, war das bei der Handrotation der Fall (prämotorisches Areal 6 und primärer Motorkortex). Das Aktivierungsmuster war in beiden Gruppen dasselbe für den ersten und den zweiten Block. Das bedeutet, dass sich in der Objekt-Objektgruppe auch im zweiten Block keine Aktivierung von Motorarealen fand, während die Hand-Objektgruppe nun auch bei der Objektrotation eine Aktivierung von motorischen und prämotorischen Arealen zeigte. Die Versuchspersonen waren dabei nicht instruiert worden, die Objekte mit ihren eigenen Händen in Verbindung zu bringen. Es scheint also möglich zu sein, motorische Rotationsstrategien auf nicht körperbezogene Objekte zu transferieren. In den Verhaltensdaten war auf deskriptiver Ebene die Hand-Objektgruppe bei der Objektrotation schneller als die Objekt-Objektgruppe.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern motorische Prozesse eine wichtige Rolle bei der mentalen Rotation spielen. Dabei gibt es Hinweise darauf, dass bei Kindern motorische Prozesse noch enger mit der mentalen Rotation verknüpft sind als bei Erwachsenen. In Studien mit Erwachsenen konnte die motorische Beteiligung nicht nur in Verhaltensstudien, sondern auch mit Hilfe von bildgebenden Verfahren gezeigt werden. Motorische Strategien bei der Rotation von Händen können auf die Rotation von Würfelfiguren transferiert werden.

In vielen der in den letzten Abschnitten erläuterten Studien wurden zusätzlich geschlechtsspezifische Effekte auf die mentale Rotationsleistung untersucht. Im nächs-

ten Abschnitt wird daher ein Überblick über die mentale Rotationsfähigkeit von Männern und Frauen gegeben.

1.2.5 Einfluss des Geschlechts auf die mentale Rotation

Die mentale Rotation gilt häufig als Beispiel einer kognitiven Aufgabe, in der Männer konsistent bessere Leistungen zeigen als Frauen. Bei einer näheren Betrachtung der Literatur fällt jedoch auf, dass diese Geschlechtsunterschiede keineswegs eindeutig sind.

In ihrer oben beschriebenen Metaanalyse untersuchten Linn und Petersen (1985) die Effektstärken der Geschlechtsunterschiede in den drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten. Dabei stellte sich die mentale Rotation als die Aufgabe heraus, die die größten Vorteile für Männer im Vergleich zu Frauen zeigte und diese Vorteile bestanden ab dem Alter von 13 Jahren. Bei der Mittelung von 18 Studien ergab sich eine Effektstärke von $d = 0.94$, was einem großen Effekt entspricht (nach Cohen, 1977). Alle 18 Studien benutzten den *Mental Rotation Test* (MRT, Vandenberg & Kuse, 1978), einen psychometrischen Papier- und Bleistift-Test. Der MRT verwendet dreidimensionale Würfelfiguren, wobei die Winkeldisparität zwischen den Figuren nicht systematisch variiert ist. Eine getrennte Erfassung von Reaktionszeiten und Fehlern ist nicht möglich, da der MRT ein *Speed-Power-Test* ist und nur eine Gesamtpunktzahl ermittelt wird. Zehn Jahre später führten Voyer, Voyer und Bryden (1995) eine weitere Metaanalyse zu Geschlechtsunterschieden der räumlichen Fähigkeiten durch. Sie unterschieden zwischen mentalen Rotationsstudien, die psychometrische Tests verwendeten und solchen, die das chronometrische Paradigma von Shepard und Metzler (1971) durchführten. Die geschätzte Effektstärke der Geschlechtsunterschiede lag in psychometrischen Studien ($N = 35$) bei $d = 0.67$, was nach Cohen (1977) einem mittleren bis großen Effekt entspricht. Deutlich kleiner ($d = 0.37$) fiel die geschätzte Effektstärke für Studien mit dem Shepard und Metzler-Paradigma aus ($N = 15$), wobei 50% dieser Studien keine Geschlechtsunterschiede aufwiesen. Demnach lässt sich feststellen, dass in psychometrischen Tests eine bessere Leistung von Männern als belegt gelten kann, im chronometrischen Paradigma die Befundlage jedoch klare Aussagen erschwert. In neueren Studien mit dem Shepard und Metzler-Paradigma

wurden zum Teil Geschlechtsunterschiede gefunden (z.B. Estes, 1998; Parsons et al., 2004; Roberts & Bell, 2000b; Voyer, Rodgers & McCormick, 2004), zum Teil nicht (z.B. Jordan et al., 2002). In Bezug auf die Parameter der mentalen Rotationsfunktion ist mir nur eine Studie bekannt, die mittels eines chronometrischen Paradigmas geschlechtsspezifische Unterschiede findet: Bryden, George und Inch (1990) konnten höhere Werte in der Steigung (Experiment 1) und somit eine langsamere mentale Rotationsgeschwindigkeit für Frauen zeigen.

Viele Studien versuchen die Ursachen der potentiellen Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotation zu klären. Dabei wird die unterschiedliche Leistung von Männern und Frauen häufig mit räumlicher Vorerfahrung (z.B. Baenninger & Newcombe, 1989; Ginn & Pickens, 2005; Halpern, 1986), Sozialisation (z.B. Richardson, 1994), genetischen und hormonellen Faktoren (z.B. Boles, 1980) und unterschiedlicher kortikaler Aktivierung (z.B. Jordan et al., 2002; Roberts & Bell, 2000b) in Verbindung gebracht. Auch unterschiedliche Strategien könnten eine Rolle spielen; so gehen einige Autoren davon aus, dass Frauen eher analytisch und nicht holistisch rotieren (Casey, 1996; Eme & Marquer, 1999; Jordan et al., 2002). Bryden et al. (1990) konnten jedoch zeigen, dass die Komplexität der Stimuli keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Rotationsleistung von Männern und Frauen hat, woraus sie schlossen, dass beide Geschlechter die gleichen Strategien benutzten. Für die Annahme, dass hormonelle Faktoren entscheidend sind (z.B. Casey, 1996; Halpern & Tan, 2001; Hooven, Chabris, Ellison & Kosslyn, 2004; Kimura & Hampson, 1994) sprechen Studien, in denen jüngere Kinder nur geringe oder keine Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit aufweisen, diese sich aber mit beginnender Pubertät ausbilden (Newcombe, Bandura & Taylor, 1983; Sanders & Soares, 1986; Waber, 1976). Voyer et al. (1995) fanden in ihrer Metaanalyse jedoch auch für präpubertäre Kinder Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit ($d = 0.33$). Levine, Huttenlocher, Taylor und Langrock (1999) konnten eine bessere Leistung für Jungen in einem psychometrischen mentalen Rotations- und Transformationstest sogar ab dem Alter von 4 ½ Jahren zeigen.

Roberts und Bell (2000b) fanden schnellere Reaktionszeiten für Männer als für Frauen in einer computergestützten mentalen Rotationsaufgabe. In einer weiteren Studie

versuchten sie diese Geschlechtsunterschiede mit dem Einfluss von Computererfahrung in Verbindung zu setzen (Roberts & Bell, 2000a). Eine Versuchsgruppe erhielt vor der mentalen Rotationsaufgabe zur Gewöhnung an den Computer eine computerisierte Farben-Zuordnungsaufgabe. Es zeigte sich, dass diese Aufgabe einen Einfluss auf die Leistung im mentalen Rotationstest hatte: Während sich in der Versuchsgruppe, die den computerisierten Farben-Zuordnungstest durchführte, keine Geschlechtsunterschiede feststellen ließen, schnitten Männer in der Versuchsgruppe ohne vorherige Aufgabe am Computer besser ab als Frauen. Demnach könnten – Roberts und Bell zufolge – unterschiedliche Leistungen von Frauen und Männern in der mentalen Rotation zumindest teilweise auf die unterschiedliche Vertrautheit mit dem Computer zurückzuführen sein. Kritisch an dieser Studie muss jedoch angemerkt werden, dass Vorerfahrungen mit dem Computer nicht erfasst wurden. Des Weiteren erscheint diese Erklärung als Ursprung der Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit nicht haltbar, da gerade in Papier- und Bleistift-Tests die größten Geschlechtsunterschiede auftreten. Es scheint jedoch wichtig, bei der Durchführung einer Studie mit einem computergestützten mentalen Rotationstest die Computererfahrung mit zu erheben.

Die Ergebnisse der Studien, die Geschlechtsunterschiede bei der mentalen Rotation untersuchen, sind demnach inhomogen. Einige Studien nehmen jedoch an, dass schon im Kindesalter die Leistung von Jungen besser ist als die der Mädchen. Im nächsten Absatz wird erläutert, ab welchem Alter Kinder in der Lage sind, mental zu rotieren und wie sich die mentale Rotationsfähigkeit mit steigendem Alter entwickelt.

1.3 Mentale Rotationsfähigkeit von Kindern

Als erste Annäherung an die Untersuchung der mentalen Rotationsfähigkeit von Kindern können Jean Piagets Studien zur Entwicklung des Raumverständnisses gelten (z.B. Piaget & Inhelder, 1956). Nach Piaget ist die bildhafte Vorstellung in der präoperationalen Phase statisch. Der Übergang von einer statischen zu einer kineti-

schon bildhaften Vorstellung ist ein Merkmal der beginnenden konkret-operationalen Phase. Um zu einer kinetischen Vorstellung zu kommen, muss das Kind antizipieren können, wie ein Objekt aussehen wird, nachdem es bewegt oder transformiert worden ist. Diese anspruchsvolle kognitive Leistung ist somit erst im Alter von etwa sieben bis acht Jahren möglich. Im folgenden Abschnitt wird sich zeigen, dass Kinder schon früher in der Lage sind, mental zu rotieren.

1.3.1 Studien zur mentalen Rotation bei Kindern

Marmor (1975, 1977) war die erste, die die mentale Rotation bei Kindern systematisch untersuchte. Sie nahm an, dass Kinder schon vor dem von Piaget und Inhelder (1956) propagierten Alter in der Lage sind, Objekte mental zu rotieren. Dabei stützte sich ihre Annahme auf methodische Schwächen in Piagets und Inhelders Studien. Sie kritisierte die Verwendung von Zeichnungen und Gesten der Kinder als Antwortmaße, die erstens sehr stark von der Interpretation des Versuchsleiters abhängen und zweitens mit den Ausdrucksmöglichkeiten der Kinder in Zusammenhang stehen würden. Marmor dagegen setzte Reaktionszeit- und Fehlermessungen ein. In ihrer ersten Studie (1975), an der 20 fünfjährige und 20 achtjährige Kinder teilnahmen, verwendete sie etwa 20 cm hohe Figuren in Bärenform, die einen Arm nach unten und einen Arm nach oben hielten. Die zwei nebeneinander präsentierten Bären konnten dabei entweder denselben Arm („identisch“) oder verschiedene Arme („gespiegelt“) nach oben halten. 60 Durchgänge mentaler Rotationen wurden bearbeitet. Jüngere Kinder antworteten dabei deutlich langsamer, auch in der 0°-Bedingung, die keine Rotation erforderte (2800 ms, ältere 1560 ms). Die mentale Rotationsgeschwindigkeit unterschied sich mit dem Alter: Während die jüngeren mit 67°/s mental rotierten, erreichten die älteren Kinder eine Geschwindigkeit von 167°/s. Außerdem begingen die Jüngeren mehr Fehler als die Älteren. Beide Altersgruppen zeigten eine lineare Zunahme der Reaktionszeiten mit steigender Winkeldifferenz, was als Beleg gelten kann, dass Kinder schon ab fünf Jahren fähig sind, Objekte mental zu rotieren. In einer weiteren Studie konnte Marmor (1977) zeigen, dass bereits Vierjährige Objekte mental rotieren können. In dieser Studie wurden zusätzlich Zeichnungen von Eistüten verwendet, bei denen an einer Seite eine Kugel nicht vollständig war. Vier-

jährige erreichten eine mentale Rotationsgeschwindigkeit von $37^\circ/s$, was deutlich langsamer war als die der Fünfjährigen ($84^\circ/s$) und die der Erwachsenen ($240^\circ/s$). Kosslyn, Margolis, Barrett und Goldknopf (1990) konnten bestätigen, dass fünfjährige Kinder bereits in der Lage sind, zweidimensionale Figuren mental zu rotieren, sie jedoch eine geringere Rotationsgeschwindigkeit aufweisen als Achtjährige und eine sehr viel geringere als 14-Jährige und Erwachsene.

Den weiteren Entwicklungsverlauf der mentalen Rotationsfähigkeit zeigten Kail et al. (1980) auf. Sie untersuchten Viertklässler und Erwachsene (Experiment 1) beziehungsweise Dritt- und Sechstklässler und Erwachsene (Experiment 2). Als Stimuli wurden alphanumerische Zeichen und abstrakte Symbole verwendet. In 144 Durchgängen wurden nebeneinander zwei identische oder gespiegelte Symbole präsentiert. Die Daten aller Altersstufen zeigten eine lineare Beziehung zwischen Reaktionszeiten und Winkeldisparitäten, wobei die Steigungen für die abstrakten Symbole höher waren als die der alphanumerischen Zeichen und die Steigungen mit dem Alter abnahmen. Die mentale Rotationsgeschwindigkeit für Buchstaben betrug für Erwachsene etwa $263^\circ/s$, für Sechstklässler $212^\circ/s$ und für Viertklässler $147^\circ/s$.

Estes (1998) ging der Frage nach, ob Kinder spontan oder aufgrund der Testinstruktion mental rotieren, wenn ihnen eine mentale Rotationsaufgabe präsentiert wird. Als Stimuli dienten einfache Strichzeichnungen eines Affen, die am Computer präsentiert wurden. Aufgabe der vier- und sechsjährigen Kinder war es, zu entscheiden, ob die paarweise präsentierten Affen denselben Arm hoben oder nicht. Dabei wurden sie nicht ausdrücklich instruiert, mental zu rotieren. Die Fehlerzahlen sanken mit dem Alter. Während die Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Alter nicht berichtet wurden, wurde der Vorhersagekoeffizient (R^2) der mentalen Rotationsfunktion angegeben. Dieser lag bei den Vierjährigen bei .25, bei den Sechsjährigen bei .59. Aufgrund dieser Ergebnisse und introspektiver Berichte der Kinder ging Estes davon aus, dass nur wenige der vierjährigen und die meisten der sechsjährigen Kinder spontan mental rotierten. Dabei scheint die Art des Stimulusmaterials eine Rolle zu spielen: Rosser, Ensing, Gilder und Lane (1984) konnten zeigen, dass Kinder im Alter von vier und fünf Jahren große Schwierigkeiten haben, Stimuli mental zu rotieren, die kaum richtungshinweisende Information enthalten. Die Kinder antworteten auf

Zufallsniveau, wenn ein runder Kreis mit nur einem Richtungshinweis präsentiert wurde.

Schon junge Kinder sind demnach in der Lage, Objekte mental zu repräsentieren und einer Transformation zu unterziehen. Das gilt für verschiedene Stimuli, wobei in den meisten Studien im Kinderbereich einfachere zweidimensionale Stimuli statt den im Erwachsenenbereich vorzugsweise benutzten dreidimensionalen Würfelfiguren verwendet wurden. Doch womit kann die Leistungssteigerung in der mentalen Rotationsfähigkeit mit steigendem Alter erklärt werden?

1.3.2 Erklärungsansätze zur mentalen Rotation bei Kindern

Verschiedene Ansätze versuchen die Leistungsunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit mit steigendem Alter und zwischen Kinder desselben Alters zu erklären. Die Schwierigkeiten jüngerer Kinder bei der mentalen Rotation untersuchten Roberts und Aman (1993). Sechs- und achtjährige Kinder sollten entscheiden, ob eine Puppe sich nach rechts oder links drehen sollte, um in die Richtung eines Gegenstandes zu blicken. Parallel wurde die Leistung in einer computerisierten Form derselben Aufgabe erfasst. Die mentale Rotation in diesem Falle erfordert entweder eine Rotation des eigenen Referenzrahmens oder des Displays. Die typische mentale Rotationsfunktion zwischen Reaktionszeiten und Winkeldisparität konnte gefunden werden. Jüngere Kinder schienen die Richtungsentscheidungen anhand eines stationären egozentrischen Rahmens getroffen zu haben, während ältere zwar auch einen egozentrischen Rahmen benutzten, diesen aber in andere Orientierungen ausrichten konnten. Inwiefern sich die Ergebnisse jedoch auf Studien mit dem klassischen mentalen Rotationsparadigma übertragen lassen, ist ungewiss; einige Studien verdeutlichen die Unterschiede zwischen Aufgaben, die die Drehung des Displays und Aufgaben, die die Drehung des Referenzrahmens erfordern (z.B. Zacks, Mires, Tversky & Hazeltine, 2000).

In den letzten Jahren mehren sich neurophysiologische und bildgebende Studien zur mentalen Rotation im Kinderbereich (z.B. Booth et al., 2001; Roberts & Bell, 2000b; Roberts & Bell, 2002), die versuchen, Entwicklungsfortschritte anhand spezifischer

Gehirnaktivierungen zu erklären. Heil und Jansen-Osmann (2006b) konnten in einer neurophysiologischen Studie mittels ereigniskorrelierter Potentiale zeigen, dass Kinder im Alter von sieben bis acht und elf bis zwölf Jahren ebenso wie Erwachsene einen spezifischen mentalen Rotationseffekt (abnehmende Negativierung mit zunehmender Winkeldisparität) über dem Parietalkortex aufweisen. Dieser Effekt konnte in einer weiteren Studie nicht nur repliziert, sondern auch gegen Alternativerklärungen (z.B. unspezifische Schwierigkeitseffekte) abgesichert werden (Heil & Jansen-Osmann, 2006a). Des Weiteren zeichnete sich bei jüngeren Kindern während der Bearbeitung mentaler Rotationen eine Linkslateralität ab, die mit steigendem Alter abnahm (gemessen an parietalen Elektroden), was die Autoren als Hinweis auf einen Wechsel von einer analytischen zu einer holistischen Strategie werten. Weitere Studien untersuchten Leistungsunterschiede der mentalen Rotationsleistung unter anderem im Zusammenhang mit dem pränatalen Hormonlevel (z.B. Grimshaw, Sitarenios & Finegan, 1995; Resnick, Berenbaum, Gottesman & Bouchard, 1986), mit räumlicher Umwelterfahrung (z.B. Newcombe & Huttenlocher, 2000; Sherman, 1967) oder der sozialen Schicht (z.B. Waber, Carlson & Mann, 1982). So fanden Grimshaw et al. (1995) beispielsweise eine Korrelation zwischen der Leistung in einem mentalen Rotationstest und dem pränatalen Testosteronlevel für Mädchen, nicht aber für Jungen. Die Befundlage in den meisten dieser Studien ist jedoch schwach und inhomogen.

Ein anderer Ansatz ist der Versuch, den Leistungszuwachs mit steigendem Alter in mentalen Rotationsaufgaben mit einem globalen Entwicklungstrend in der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erklären. Dazu wurden neben einer mentalen Rotationsaufgabe andere kognitive Aufgaben wie eine Wahlreaktionszeitaufgabe, eine Buchstabenabgleichaufgabe und eine abstrakte Vergleichsaufgabe durchgeführt (Hale, 1990). In allen vier Aufgaben waren Zehnjährige langsamer als Zwölfjährige und diese wiederum langsamer als 15-Jährige. Tatsächlich zeigten die Ergebnisse, dass die Verarbeitungsgeschwindigkeit in allen vier Aufgaben im gleichen Maße steigt, was für eine globale kognitive Entwicklung spricht. Ähnliche Ergebnisse stammen von Kail (1988), der identische exponentiale Funktionen zwischen Reaktionszeiten und dem Alter (8 - 22 Jahre) bei einer mentalen Rotations-, einer Gedächtnissuch-, einer Namensabruf-, einer visuellen Such- und einer mentalen Additions-

aufgabe fand. Einzige Ausnahme war eine Aufgabe zum logischen Schlussfolgern. Kail ging davon aus, dass ein gemeinsamer Mechanismus die Leistung in geschwindigkeitsabhängigen Aufgaben limitiert, wobei dieser Mechanismus am ehesten eine Verarbeitungsressource darzustellen scheint, die mit steigendem Alter größer wird.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Kinder schon ab einem Alter von vier bis fünf Jahren in der Lage sind, mental zu rotieren. Zumeist wird in Studien mit Kindern zweidimensionales Stimulusmaterial verwendet, oft werden sogar nur ein oder zwei verschiedene Stimuli wiederholt präsentiert. Die Rotationsgeschwindigkeit nimmt mit steigendem Alter zu, wobei dieser Anstieg im Einklang mit der Erhöhung der allgemeinen kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit vonstatten zu gehen scheint. Es stellt sich die Frage, ob sich die mentale Rotationsgeschwindigkeit auch durch Trainingsprogramme erhöhen lässt. Einen Überblick über Trainingsstudien im Erwachsenen- und Kinderbereich gibt der folgende Abschnitt.

1.4 Training der mentalen Rotation

Bevor auf Studien zum Training der räumlichen Fähigkeiten und der mentalen Rotation eingegangen wird, möchte ich einige Vorüberlegungen zu kognitivem Training im Allgemeinen voranstellen. Klauer (2001) definiert kognitives Training als „eine wiederholt ausgeführte Tätigkeit, die die Ausführung der Tätigkeit faktisch verbessert, oder sie ist eine Handlung, die darauf gerichtet ist, die Fertigkeit oder Fähigkeit zur Ausübung der Tätigkeit zu verbessern“ (S. 4). Als Training versteht sich demnach jegliche Intervention, die die Ausübung der zu trainierenden Tätigkeit verbessert. Im Fall der Verbesserung durch wiederholte Ausübung handelt es sich eher um Übungseffekte.

In Trainingsstudien wird zumeist ein Prä-Post-Versuchsplan eingesetzt, bei dem sowohl vor als auch nach der Intervention die Leistung in der zu trainierenden Aufgabe erhoben wird. Kritisch sind Studien, die den Prä- und den Posttest nur einer Gruppe vergleichen und aufgrund der Differenz zwischen Prä- und Posttest Aussagen über die Wirkung eines Trainings treffen. Lipsey und Wilson (1993) konnten zeigen, dass der Trainingseffekt in einem solchen Fall überschätzt werden kann. In ihrer

Metaanalyse erwiesen sich die Trainingseffekte in Ein-Gruppen-Versuchsplänen als deutlich erhöht im Vergleich zu Versuchsplänen mit mindestens einer Kontrollgruppe. Auch in einer neueren Arbeit verdeutlichen die Autoren den großen Einfluss der verwendeten Methode (Wilson & Lipsey, 2001). Zu Überschätzung des Trainingseffektes bei Versuchsplänen ohne Kontrollgruppe kommt es vor allem aufgrund von Testwiederholungseffekten, die auch dann auftreten, wenn im Posttest eine parallele Testversion verwendet wird (siehe z.B. Willson & Putnam, 1982). Des Weiteren ist gelegentlich auch ein Placebo-Effekt, das heißt, dass alleine schon die Teilnahme an einem Training oder das Wissen um die Teilnahme fördernd wirkt, oder der fördernde Effekt von Zuwendung zu beobachten (siehe z.B. Adair, Sharpe & Huynh, 1990). Diese Effekte scheinen jedoch meistens sehr gering zu sein (Klauer, 2001).

1.4.1 Räumlich-kognitives Training

Trainingsstudien zum räumlichen Denken können in verschiedenen Formen durchgeführt werden (siehe Baenninger & Newcombe, 1989). Im Sinne einer wiederholt ausgeführten Tätigkeit nach Klauer (2001) wird in vielen unten berichteten Studien den Versuchsteilnehmern eine große Anzahl an Durchgängen derselben räumlichen Aufgabe vorgegeben und es wird die Veränderung über die Zeit gemessen (z.B. Kaushall & Parsons, 1981; Tarr & Pinker, 1989). In manchen Studien wird zusätzlich die Leistung über die Zeit hinweg verglichen mit der Leistung einer Kontrollgruppe, die weniger Durchgänge oder eine andere Aufgabe erhält (z.B. Heil, Rösler, Link & Bajric, 1998). Das Training ist dabei hoch stimulusspezifisch, da das Trainingsmaterial identisch mit dem Testmaterial ist. In einigen Studien wird jedoch auch der Transfer auf andere räumliche Aufgaben getestet (z.B. Wallace & Hofelich, 1992). Andere Studien arbeiten nicht nur mit der bloßen Wiederholung derselben Aufgabe, sondern versuchen zum Beispiel durch räumliche Computerspiele bestimmte Strategien zu induzieren oder mentale Prozesse zur Veranschaulichung zu externalisieren (z.B. De Lisi & Cammarano, 1996; Kyllonen, Lohman & Snow, 1984; Okagaki & Frensch, 1994; Souvignier, 2000). Während diese letztgenannten Studien Trainingseffekte auf räumliche Fähigkeiten erfassen, handelt es sich bei den davor beschriebenen Studien eher um Übungseffekte (Baenninger & Newcombe, 1989).

Souvignier (2001) teilt räumliche Trainingsprogramme ein in übende und informierende Interventionen und unterteilt letztere noch einmal in indirekte Förderung, wie alltägliche Raumerfahrung, und in direkte Förderung, wie Übungen durch Testaufgaben oder Beschäftigung mit (räumlichen) Computerspielen. In ihrer Metaanalyse zu räumlich-kognitivem Training untersuchten Baenninger und Newcombe (1989) den Effekt unterschiedlicher Trainingsarten und -dauern. Spezifisches Training, das direkt auf einen einzelnen Bereich der räumlichen Fähigkeiten wirken sollte, zeigte die größten Effekte. Nicht verwunderlich ist, dass sich eine mittlere Trainingsdauer (zwischen 3 Wochen und einem halben Jahr) als effektstärker erwies als ein kurzes Training (zwischen einer einmaligen Intervention und drei Wochen). Einen guten Überblick über Studien zum Training der räumlichen Fähigkeiten gibt auch Souvignier (2000).

Klauer (2001) wies darauf hin, dass ein geeignetes Training gerade im Kinderbereich schwierig zu realisieren ist. Unterfordert man ein Kind, ist es wahrscheinlich, dass es sich langweilt. Eine Überforderung kann auf der anderen Seite zu einem Frustrationseffekt führen. In beiden Fällen ist nicht mit einem positiven Trainingseffekt zu rechnen. Der Trainingseffekt ist am größten in einer für dieses Training sensitiven Lebensphase, deren Zeitpunkt jedoch von Kind zu Kind variieren kann.

Kein eindeutiges Bild ergaben Analysen zur Vorhersage individueller Trainingseffekte, wenn geklärt werden soll, ob von einem räumlich-kognitiven Training eher schwächere oder stärkere Teilnehmer („Matthäus-Effekt“) profitieren. In einigen Studien konnte gezeigt werden, dass insbesondere Versuchspersonen mit anfangs schwachen Fähigkeiten sich verbessern (z.B. Rizzo et al., 2001; Saccuzzo, Craig, Johnson & Larson, 1996). Das Training wirkt in diesem Fall kompensatorisch. Andererseits ist es möglich, dass das Training vor allem bei Kindern mit unterschiedlichen kognitiven Voraussetzungen zu einer Art Schereneffekt führt, da die anfangs Guten besonders profitieren und noch besser werden (Souvignier, 1999). Entscheidender Faktor könnte der Inhalt des Trainings sein. In einer Untersuchung von Kirby und Boulter (1999) zum Training räumlich-geometrischer Fähigkeiten mit Jugendlichen zeigte sich, dass Schwächere besonders von einem traditionellen Training profitier-

ten, Versuchspersonen mit guten räumlichen Fähigkeiten jedoch von einem abstrakten räumlichen Training.

1.4.2 Studien zum Training der mentalen Rotation

In zahlreichen Studien konnte gezeigt werden, dass die mentale Rotationsfähigkeit trainierbar ist (z.B. Berg, Hertzog & Hunt, 1982; Bethell-Fox & Shepard, 1988; Kail & Park, 1990; Kaushall & Parsons, 1981; Voyer, 1995). Das Training besteht dabei zumeist aus der wiederholten Bearbeitung mentaler Rotationen, wobei die Länge des Trainings stark zwischen den Studien variiert. Bei Studien mit dem Shepard und Metzler-Paradigma lassen sich die Effekte eines mentalen Rotationstrainings zumeist auf die Reaktionszeiten abbilden, in einigen Studien zusätzlich auf die Fehlerzahlen (z.B. Heil et al., 1998; Lohman & Nichols, 1990; Wallace & Hofelich, 1992).

In einer Studie von Kaushall und Parsons (1981) wurden sieben Blöcke à 144 mentaler Rotationen (dreidimensionale Würfelfiguren) präsentiert. Die Reaktionszeiten wurden dabei über die Blöcke hinweg kleiner. Für jede der sechs Versuchspersonen ergab sich eine negative Beziehung zwischen Blocknummer und Rotationsgeschwindigkeit. Besonders interessant dabei ist, dass – mit einer Ausnahme – im letzten Block keine der Versuchspersonen mehr einen Zusammenhang zwischen Winkeldisparität und Reaktionszeit zeigte. Eine Langzeitübungsstudie wurde von Leone, Taine und Droulez (1993) durchgeführt. Als Stimuli dienten dreidimensionale Würfelfiguren, die in 12 beziehungsweise 15 Übungsblöcken à 30 Minuten präsentiert wurden. Während die Fehlerrate nicht bedeutend sank, erhöhte sich die Rotationsgeschwindigkeit. Versuchspersonen wurden von Block zu Block schneller, wobei – im Gegensatz zu Kaushall und Parsons – auch im letzten Block noch eine linear ansteigende Rotationsfunktion aufgezeigt werden konnte. Eine differentielle Analyse zeigte, dass Versuchspersonen mit schwacher mentaler Rotationsfähigkeit nicht in einem höheren Maße vom Training profitierten als gute mentale Rotierer. Auch mit zweidimensionalen Stimuli lassen sich Trainingseffekte aufzeigen. So fand Cooper (1975) mit abstrakten zweidimensionalen Zeichen einen Rückgang der Reaktionszeiten über 6 Blöcke mentaler Rotationen hinweg. Wallace und Hofelich (1992) untersuchten, ob ein mentales Rotationstraining mit zweidimensionalen abstrakten Objekten auf an-

dere Aufgaben mit ähnlichen Anforderungen generalisiert. In ihrer Studie bearbeiteten Versuchspersonen so viele Blöcke mentaler Rotationen bis keine Verbesserung in Geschwindigkeit und Genauigkeit mehr zu beobachten war (Experiment 1). Es zeigte sich, dass die Reaktionszeiten sowie die Fehlerzahlen signifikant sanken. Zusätzlich wurde vor und nach der Bearbeitung der mentalen Rotation die Performanz im Bearbeiten geometrischer Analogien erfasst. Hierbei mussten die Versuchsteilnehmer ein geometrisches Analogieproblem lösen, bei dem eine mentale Transformation ausgeführt werden muss. Die Leistung stieg nach dem mentalen Rotationstraining stark an. Dagegen zeigte sich keine Verbesserung für eine zweite Versuchsgruppe, die ein räumliches Gedächtnistraining erhalten hatte. Der Trainingseffekt war bidirektional, in dem Sinne, dass nach einem Training mit geometrischen Analogien sich auch die mentale Rotationsleistung verbesserte (Experiment 2). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch ein mentales Rotationstraining der Rotationsprozess an sich trainiert wird und dieser Prozess auch bei neuartigen Stimuli angewendet werden kann.

Welcher kognitive Prozess bei einem Training der mentalen Rotation trainiert wird, wird kontrovers diskutiert. Einige Studien, die die mentale Rotation durch extensive Wiederholungen mentaler Rotation üben, belegen, dass der Rückgang der Reaktionszeiten keine Rückschlüsse auf den Prozess der mentalen Rotation an sich zulässt. Tarr und Pinker (1989) präsentierten ihren Versuchspersonen über 2000 Durchgänge mentaler Rotationen mit dreidimensionalen abstrakten Objekten (Experiment 1), die in 13 Blöcke aufgeteilt waren. Sowohl die Reaktionszeit als auch die Steigung und der Achsenabschnitt der mentalen Rotationsfunktion nahmen über die ersten 12 Blöcke hinweg ab. Die Steigung nahm um das Dreifache ab und lag im letzten Block bei 1.0 ms/Grad, was einer schnellen Rotationsgeschwindigkeit von $1000^\circ/\text{s}$ entspricht. Im 13. Block wurden „Überraschungsdurchgänge“ präsentiert, die aus den vorher gelernten Objekten in neuen, vorher nicht gelernten Winkeldisparitäten bestanden. Für diese Überraschungsdurchgänge fiel die Rotationsgeschwindigkeit wieder auf das Niveau des ersten Blocks. Der Effekt der wiederholten Bearbeitung mentaler Rotationen scheint demnach auf gedächtnisbasierten Prozessen zu beruhen und der kognitive Prozess der mentalen Rotation während der Übung wird mehr und mehr

durch den Abruf zuvor gelernter Objekte in gelernten Winkelstellungen ersetzt. Zu ähnlichen Befunden kamen Heil et al. (1998). Ihre Versuchsteilnehmer bearbeiteten drei Testblöcke mit jeweils 960 mentalen Rotationen. Stimuli waren hierbei dreidimensionale Würfelfiguren. Vor dem zweiten Testblock erhielt eine Übungsgruppe zusätzlich vier Blöcke à 480 mentaler Rotationen, in denen die Reaktionszeiten von Block zu Block sanken (während eine Kontrollgruppe keine Alternativbeschäftigung erhielt). In den Testblöcken 2 und 3 unterschieden sich die Leistungen der Übungs- und Kontrollgruppe nur dann, wenn zuvor gelernte Objekte in zuvor gelernten Winkelstellungen präsentiert wurden; in diesem Fall war die Übungsgruppe beträchtlich schneller. Die beiden Gruppen unterschieden sich in ihrer Reaktionszeit jedoch weder für gelernte Objekte in neuen Orientierungen noch für neue Objekte in gelernten Orientierungen. Die Autoren fassen folgendermaßen zusammen (Heil et al., 1998, S. 105):

Practice speeds up performance! No doubt about it, but higher speed must not mean that complex mental processes like an image transformation routine are performed faster. The present data suggest that the higher speed of postulated mental operations may simply come from better developed memory representations. This hypothesis does not deny the existence of the postulated mental operations. They most likely exist, and they have to be invoked by the unskilled to solve the task. However, due to practice, these resource-demanding operations become superfluous after a while.

Im Kinderbereich gibt es nur vereinzelt Studien zur Trainierbarkeit der mentalen Rotationsfähigkeit. Marmor (1977) untersuchte in der oben beschriebenen Studie auch den Effekt eines kurzen Trainings. Die Hälfte der Kinder bekam vor dem mentalen Rotationstest eine drehbare Version der Stimuli. Im ersten von sieben Durchgängen drehte der Versuchsleiter manuell einen Stimulus, in den nächsten Durchgängen sollten die Kinder selbst drehen. Das Rotationstraining hatte keinerlei Einfluss auf die mentale Rotationsleistung. In einer Replikation dieser Studie hatte das Training zwar keinen Einfluss auf die gemittelten Reaktionszeiten, jedoch auf die mentale Rotationsfunktion von Fünfjährigen (Platt & Cohen, 1981): Während untrainierte Kinder keine mentale Rotationsfunktion zeigten und die Kinder demnach

nicht in der Lage waren, mental zu rotieren, wiesen die Reaktionszeiten der Trainingsgruppe eine lineare Beziehung zur Winkeldisparität auf.

Eine Studie mit Elfjährigen und Erwachsenen zur extensiven Ausführung mentaler Rotationen führten Kail und Park (1990) durch. Die Kinder und Erwachsene der Übungsgruppe bearbeiteten über 3000 mentale Buchstabenrotationen, während die Kontrollgruppe nur einen Prä- und Posttest durchführte. Als Prä- und Posttest dienten ein zum Übungsprogramm identischer Test mit Buchstaben und zusätzlich eine mentale Rotationsaufgabe mit abstrakten Symbolen. Die Rotationsgeschwindigkeit für Kinder nahm durch die Übung erheblich zu ($212^\circ/\text{s}$ auf $1200^\circ/\text{s}$), während sie sich in der Kontrollgruppe nicht änderte. Bei den Erwachsenen zeigte sich kein Unterschied in der mentalen Rotationsgeschwindigkeit zwischen der Experimental- und der Kontrollgruppe. Transfereffekte auf die mentale Rotation mit abstrakten Symbolen wurden nur für den Achsenabschnitt gefunden, in Bezug auf die Rotationsgeschwindigkeit zeigte sich weder für Kinder noch für Erwachsene eine Verbesserung durch die Übung. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in einer früheren Studie von Kail (1986), in der sich außerdem zeigte, dass Altersunterschiede in der mentalen Rotationsgeschwindigkeit nach etwa 1500 mentalen Rotationen sogar verschwinden. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass nicht nur für Erwachsene, sondern auch für Kinder die extensive Ausführung mentaler Rotationen nicht zu einer Verbesserung des mentalen Rotationsprozesses an sich zu führen scheint, sondern zu einem erleichterten Gedächtnisabruf. Kail und Park fassen den Übungsprozess folgendermaßen zusammen (S. 243):

In the case of mental rotation, naive subjects presumably begin performing the task by executing a resource-demanding algorithm. Adults have more available resources, so they execute the algorithm more rapidly than children. With practice, both adults and children solve the task via retrieval. Age differences are reduced and eventually eliminated when both groups have sufficient stored representations so that virtually all trials are based on retrieval of a correct answer.

Während die zuletzt genannten Studien explizit Gedächtnisprozesse beim Training der mentalen Rotation untersuchten, versuchen andere Studien „spielerisch“ die

mentale Rotationsfähigkeit zu verbessern. In diesen Studien besteht die Trainingsphase nicht aus der Übung mentaler Rotationen, sondern aus räumlichen Computerspielen. Okagaki und Frensch (1994) verwendeten das Spiel *Tetris*, in dem zweidimensionale Blockfiguren unter Zeitdruck so rotiert werden müssen, dass sie in Lücken zwischen andere Figuren passen. Während zu Beginn des Spiels die Figuren so lange gedreht werden können, bis sie passen (was zu einer Visualisierung des Rotationsprozesses führt), erfordern schwierigere Levels die mentale Rotation der Figuren, da die Zeit nicht ausreicht, in eine „falsche“ Richtung zu rotieren. In einem ersten Experiment hatte das Spielen von *Tetris* (zwölf Sitzungen à 30 Minuten) keinen Einfluss auf einen Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation. In einem zweiten Experiment wurde eine computerisierte Version eines mentalen Rotationstests verwendet und die Reaktionszeiten gemessen. Dabei konnte ein Trainingseffekt durch das Spielen von zwölf mal 30 Minuten *Tetris* gezeigt werden: Die Versuchspersonen wurden im Vergleich zu einer Kontrollgruppe schneller. De Lisi und Cammarano (1996) ließen eine Versuchspersonengruppe *Blockout* (eine dreidimensionale Version von *Tetris*) spielen, während eine Kontrollgruppe eine nicht-räumliche Computeraufgabe erhielt. Nur eine Gruppe, nämlich Frauen der Kontrollgruppe, verbesserten sich nicht. Männer profitierten demnach von der Kontrollaufgabe genauso wie von *Blockout*; die Wiederholung des MRTs schien demnach einen Effekt gehabt zu haben. In einer Studie von McClurg und Chaillé (1987) spielten Kinder im Alter von 11, 13 und 15 Jahren entweder ein „Fabrik“-Spiel, in dem durch mentale Manipulation ein dreidimensionales Produkt hergestellt werden musste, oder ein Weltraumspiel, in dem sich bewegende dreidimensionale Objekte erkannt werden mussten. Zwölf Trainingsphasen à 45 Minuten wurden durchgeführt. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne Intervention steigerten beide Computerspiele die mentale Rotationsfähigkeit. Es gab keine Interaktionen mit dem Alter oder dem Geschlecht. Eine umfangreiche Untersuchung mit lernbehinderten Kindern zwischen 12 und 17 Jahren führte Souvignier (2000) durch. In einem ersten Experiment wurde der Effekt eines Computertrainings mit *Tetris*, *Blockout* und *DrehUm* (eine Art computerisierte Version von *Tangram*) auf vier räumliche Tests erfasst: leicht abgewandelte Versionen der Untertests *Hidden Pattern*, *Hidden Figures*, *Card Rotation* und *Mental Paper Fol-*

ding aus den *French Kit of Factor-References Cognitive Tests* (Ekstrom, French, Harman & Dermen, 1976). Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die sich in gleicher Zeit mit einer Lernsoftware beschäftigte, fand Souvignier auch nach einem sechswöchigen Training mit zwei Trainingseinheiten à 30 Minuten pro Woche keine Verbesserung in diesen räumlichen Tests. Im zweiten Experiment wurde neben der Computerspielgruppe und der Kontrollgruppe (die diesmal Texte bearbeitete) eine dritte Gruppe eingeführt, die einen sechswöchigen Lehrgang (jeweils eine Trainingseinheit à 50 Minuten pro Woche) im technischen Zeichnen erhielt; die Prä- und Posttestaufgaben waren dieselben wie in Experiment 1. Alle drei Gruppen profitierten von der Intervention, die Computerspielgruppe jedoch in höherem Maße als die Kontrollgruppe und in leicht höherem Maße als die Zeichnungs-Gruppe. In einer *Follow-up*-Untersuchung vier Monate später ergab sich das gleiche Bild. In einem dritten Experiment konnte gezeigt werden, dass die Effizienz des Computertrainings gesteigert werden kann, wenn dieses durch ein Strategietraining unterstützt wird. Das Strategietraining beinhaltete die Erläuterung der einzelnen Lösungsschritte durch den Testleiter. Souvignier resümierte, dass im Bereich der räumlichen Fähigkeiten „(mittlere) Leistungssteigerungen durch eine Vielfalt von Programmen zu erzielen sind, während für eine deutliche Verbesserung ein reflektierender Umgang mit den Trainingsanforderungen notwendig ist“ (S. 166).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mentale Rotation trainierbar ist. Die Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit durch wiederholte Ausführung mentaler Rotationen scheint dabei jedoch auf gedächtnisbasierten Prozessen zu beruhen: Sowohl Erwachsene als auch Kinder profitierten zwar von der Übung, konnten den Übungsgewinn jedoch nicht auf neue, im Training nicht präsentierte Objekte transferieren. Studien mit Computerspielen versuchen dagegen den mentalen Rotationsprozess an sich zu trainieren. Die Befunde dieser Studien sind uneinheitlich. Es scheint jedoch tatsächlich möglich, die mentale Rotation mittels Computerspielen zu fördern, was vor allem auf der Visualisierung des Rotationsprozesses beruhen könnte. Der entscheidende Nachteil dieser Trainingsprogramme ist, dass nur nach sehr langen Interventionen Trainingseffekte gefunden werden. So sind die Trainingsphasen meist mehrstündig und auf verschiedene Tage verteilt.

Eine geeignete Methode, den Rotationsprozess an sich innerhalb einer kurzen Intervention zu trainieren, könnte ein manuelles Rotationstraining darstellen. Durch die enge Kopplung zwischen motorischen und mentalen Prozessen (siehe Abschnitt 1.2.4) und aufgrund der Visualisierung der Rotation, auf die auch Computerspiele zurückgreifen, kann davon ausgegangen werden, dass ein solches manuelles Training erfolgreich ist. Hierbei sollten die Veränderungen der mentalen Rotationsleistung aufgrund eines manuellen Trainings nicht gedächtnisbasiert sein.

1.4.3 Studie eines manuellen Trainings der mentalen Rotation

Die ersten Versuche die Fähigkeit zur mentalen Rotation durch ein manuelles Training zu verbessern, unternahmen Albert „Skip“ Rizzo und Kollegen (Larson et al., 1999; Parsons et al., 2004; Rizzo et al., 2001; Rizzo et al., 1999). Sie entwickelten ein manuelles Rotationstraining in einer virtuellen Realität. Die Aufgabe der Versuchspersonen hierbei war es, eine dreidimensionale Würfelfigur in dieselbe räumliche Lage zu rotieren wie eine Standardfigur und die beiden Figuren dann übereinander zu „legen“. Die beiden Figuren unterschieden sich dabei in der Bildebene oder -tiefe. Eingabegerät war ein tennisballgroßer *Cyberprop*, mit dem sowohl Translations- als auch Rotationsbewegungen möglich waren. Entsprechend der Bewegung des *Cyberprops* bewegte sich die Würfelfigur auf einer Großleinwand. Vor und nach dem Training wurde der MRT durchgeführt (in einer Parallelversion). Das Training bestand aus insgesamt 140 Durchgängen, wobei in den ersten 20 Durchgängen Würfelfiguren aus dem MRT präsentiert wurden, die in den letzten 20 Durchgängen wiederholt wurden. Die Versuchspersonen wurden beim Vergleich der ersten 20 mit den letzten 20 Durchgängen des manuellen Trainings schneller und begingen weniger Fehler, verbesserten sich also in ihrer *manuellen* Rotationsleistung. In Bezug auf die *mentale* Rotationsfähigkeit zeigte sich jedoch beim Vergleich der MRT-Punktwerte vor und nach dem Training keine signifikante Verbesserung. Auch der Vergleich zu einer Kontrollgruppe (die keine Intervention erhielt) ergab keine Hinweise auf eine Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit durch das manuelle Training. Die Analyse von differentiellen Trainingseffekten ergab immerhin, dass Versuchsperso-

nen mit anfangs schwacher mentaler Rotationsfähigkeit eine signifikante Steigerung der MRT-Werte zeigten (Rizzo et al., 2001; Rizzo et al., 1999). Außerdem wurden in derselben Studie Geschlechtsunterschiede analysiert (Parsons et al., 2004). Während Männer eine bessere Leistung im MRT-Prätest als Frauen zeigten, unterschieden sich die Geschlechter in der manuellen Rotation weder in der Geschwindigkeit noch in der Genauigkeit. Nach dem Training konnten auch im MRT keine Geschlechtsunterschiede mehr entdeckt werden. Es scheint demnach keine Geschlechtsunterschiede bei einer manuellen Rotation zu geben, in der die Rotation visualisiert und der Rotationsprozess somit nicht mental ausgeführt wird.

Warum konnten Rizzo und Kollegen keinen Einfluss des manuellen Rotationstrainings auf die mentale Rotationsfähigkeit finden? Vermutet werden kann, dass der fehlende Trainingseffekt vor allem auf den folgenden Unterschieden zwischen Training und Test begründet ist:

- (1) Es findet ein Wechsel von einem Training in einer virtuellen Realität zu einem Papier- und Bleistift-Test statt.
- (2) Die Würfelfiguren im Training haben realen dreidimensionalen Charakter, die Würfelfiguren im MRT sind einfache Strichzeichnungen (siehe Abbildung 6).
- (3) Während im Training die Standardfigur mit einer Vergleichsfigur präsentiert wird, sind es im MRT vier Vergleichsfiguren (siehe Abbildung 6).
- (4) In einem *Speed-Power-Test* wie dem MRT wird Zeitdruck erzeugt, im Training nicht (zur Auswirkung von Zeitdruck im MRT siehe z.B. Goldstein, Haldane & Mitchell, 1990).

Da spezifisches Training die größten Effekte auf die zu trainierende Tätigkeit zu haben scheint (Beanniger & Newcombe, 1989), sollten der Aufbau und die Stimuli eines manuellen Trainings und eines mentalen Rotationstests so ähnlich wie möglich sein. Auch sollte der verwendete mentale Rotationstest in der Lage sein, zwischen Reaktionszeiten und Fehlern zu unterscheiden, um Trainingseffekte detaillierter abbilden und analysieren zu können. In der Studie von Rizzo und Kollegen fehlte zudem die Untersuchung von objektspezifischen Effekten. In den hier durchgeführten Experi-

menten, die in den nächsten Abschnitten vorgestellt werden, wurde versucht, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

1.5 Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands

Die mentale Rotation genießt eine herausragende Stellung innerhalb der räumlichen Fähigkeiten. Das Paradigma der mentalen Rotation stammt von Shepard und Metzler (1971), die erstmals zeigen konnten, dass Versuchspersonen bei der Entscheidung, ob zwei im Raum gedrehte Objekte identisch oder gespiegelt sind, mental rotieren. Verschiedene Faktoren scheinen einen Einfluss auf die Reaktionszeit zur Lösung dieser Aufgabe zu haben, wie zum Beispiel die Anzahl der Stimuli oder die Art des Stimulusmaterials. Bei der mentalen Rotation scheinen sowohl perzeptuelle als auch motorische Prozesse beteiligt zu sein. Obwohl die mentale Rotation als das Beispiel einer kognitiven Aufgabe gilt, in der Männer besser abschneiden als Frauen, ist die Datenlage inkonsistent, was vor allem für Untersuchungen mit dem Shepard und Metzler-Paradigma gilt. Kinder sind ab dem Alter von fünf Jahren in der Lage, Objekte mental zu rotieren, wobei mit steigendem Alter die mentale Rotationsfähigkeit zunimmt. In den meisten Studien mit Kindern werden leichter zu verarbeitende Stimuli verwendet als in Studien mit Erwachsenen.

Sowohl Erwachsene als auch Kinder können ihre mentale Rotationsfähigkeit durch Training verbessern. Dabei scheint der Trainingseffekt jedoch gedächtnisbasiert zu sein und es wird demnach nicht der Prozess der mentalen Rotation an sich trainiert: Übung durch extensive Wiederholung mentaler Rotationen führt zu objekt- und orientierungsspezifischen Effekten. Hinweise darauf, dass der Rotationsprozess an sich sensitiv für Training sein könnte, finden sich in Studien mit Computerspielen. Die Befundlage ist jedoch nicht eindeutig und es muss scheinbar sehr lange trainiert werden, um eine Verbesserung zu erzeugen. Vor allem im Hinblick auf die Verbesserung der räumlichen Fähigkeiten von Kindern mit spezifischen Beeinträchtigungen in diesem Bereich, zum Beispiel Kinder mit Spina bifida, erscheint es essentiell, dass der Prozess der mentalen Rotation an sich trainiert wird. Ein Training, das dies zu

leisten vermag, könnte eine manuelle Rotationsaufgabe sein, die gleichzeitig zur motorischen Anforderung den Rotationsprozess visualisiert. Diese Annahme beruht auf Befunden, dass die mentale Rotation eine verdeckte motorische Rotation zu sein scheint, perzeptuelle Prozesse bei der mentalen Rotation eine Rolle spielen und motorische Rotationsstrategien zudem auf die mentale Rotation übertragbar sind (Wraga et al., 2003). Besonders Kinder sollten von einem manuellen Training profitieren, da die Verknüpfung von mentalen und motorischen Prozessen bei der mentalen Rotation noch enger zu sein scheint als bei Erwachsenen (Frick et al., 2005; Funk et al., 2005).

Ein erster Versuch, ein manuelles Training der mentalen Rotation zu entwickeln, wurde von Rizzo und Kollegen (z.B. Rizzo et al., 2001) unternommen. Unterschiede zwischen der mentalen und der manuellen Rotationsaufgabe schienen ausschlaggebend dafür zu sein, dass kein Trainingseffekt gefunden werden konnte. Da spezifisches Training die größten Effekte haben (Baenniger & Newcombe, 1989), sollten der Aufbau und die Stimuli eines manuellen Trainings und eines mentalen Rotationstests so ähnlich wie möglich sein. Auch sollte der verwendete mentale Rotationstest zwischen Reaktionszeiten und Fehlern unterscheiden können, um Trainingseffekte detaillierter abzubilden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden ein computerbasiertes manuelles Trainingsprogramm und ein mentaler Rotationstest, der den oben genannten Anforderungen gerecht wird, entwickelt. Die manuelle und die mentale Rotationsaufgabe bestanden aus Stimuli derselben Klasse. Da Shepard und Metzler (1971) zeigen konnten, dass keine Unterschiede zwischen Drehungen in der Bildebene und in der Bildtiefe bestehen, wurden nur Drehungen in der Bildebene verwendet. Die Drehung in der manuellen Aufgabe wurde mittels eines Joysticks vollführt, der in eine Box eingebaut war, wodurch eine Übereinstimmung zwischen der Ebene der Handbewegung und der Rotation der Objekte in der Bildebene des Monitors erreicht wurde (siehe hierzu Wohlschläger & Wohlschläger, 1998).

Das Ziel des ersten Experiments war es, den computerbasierten mentalen Rotationstest zu validieren, um ihn in Experiment 2 als Test zur Erfassung der mentalen Rota-

tionsfähigkeit vor und nach dem Training anzuwenden. Es wurde angenommen, dass das computerbasierte manuelle Training sowohl bei Erwachsenen (Experiment 2) als auch bei Kindern (Experiment 3) den mentalen Rotationsprozess an sich verbessert. Außerdem sollten schlechte mentale Rotierer in einem höheren Maße von einem manuellen Training profitieren als gute mentale Rotierer. In einem weiteren Experiment (Experiment 4) wurde das Training mit Spina bifida-Kindern angewendet. Erstmals überhaupt wurden die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida und der Einfluss eines Rotationstrainings systematisch untersucht. Es wurde angenommen, dass diese Kinder aufgrund ihrer stark beeinträchtigten räumlichen Fähigkeiten in einem höheren Maße als gesunde Kinder von einem manuellen Training profitieren können. Einen Hinweis darauf, dass ein solches Training die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida verbessern könnte, stammt von der oben beschriebenen Studie von Rizzo et al. (1999), die aufgrund ihrer Befunde schlossen, dass ein manuelles Training der mentalen Rotation „has a good potential as a tool for cognitive assessment and rehabilitation“ (S. 93).

2 Experiment 1¹

In Experiment 1 wurde der hier entwickelte computerbasierte mentale Rotationstest validiert. Die konvergente Validität wurde erfasst, indem der computerbasierte mentale Rotationstest mit dem MRT (Vandenberg & Kuse, 1978), einem im klinischen und experimentellen Bereich häufig angewandten Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation, korreliert wurde. Es wurde angenommen, dass sich im mentalen Rotationstest die typische mentale Rotationsfunktion zwischen Reaktionszeiten und Winkeldisparität findet, die üblicherweise in chronometrischen Tests der mentalen Rotation gezeigt werden kann. Darüber hinaus wurde eine bessere Leistung für Männer als für Frauen im Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation erwartet.

2.1 Methode

2.1.1 Stichprobe

107 Versuchspersonen zwischen 17 und 36 Jahren nahmen an Experiment 1 teil. Fünf Teilnehmer wurden aus der Datenanalyse ausgeschlossen, da ihre Fehlerrate im computerbasierten mentalen Rotationstest über 40% lag. Die berichteten Ergebnisse basieren somit auf 102 Versuchspersonen ($M = 22.20$ Jahre, $SD = 3.98$), wovon die Hälfte weiblich war.

2.1.2 Versuchsaufbau

Fragebogen: Auf einem Fragebogen wurden Fragen nach Geschlecht, Alter, Händigkeit, Studienfach beziehungsweise Beruf und Computernutzung (in Stunden/Tag) zusammengestellt.

¹ Eine Beschreibung der Experimente 1 und 2 findet sich auch in Wiedenbauer, Schmid & Jansen-Osmann (in press). Manual training of mental rotation. *European Journal of Cognitive Psychology*. In einem Konferenzband ist zudem erschienen Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2005). Manual training of mental rotation. In K. Opwis & I.-K. Penner (Eds.), *Proceedings of KogWis05* (pp. 207-212). Basel: Schwabe Verlag.

Test der mentalen Rotationsfähigkeit: Die mentale Rotationsfähigkeit wurde durch den *Mental Rotation Test* (MRT, überarbeitete Version von Peters, Laeng, Latham & Jackson, 1995; Vandenberg & Kuse, 1978) erfasst. Der MRT ist ein Papier- und Bleistift-Test, in dem in einer Zeile eine Standardwürfel figur und vier Vergleichswürfelfiguren präsentiert werden (siehe Abbildung 6). Die Aufgabe der Probanden ist es, zu markieren, welche zwei der vier Vergleichswürfelfiguren mit der Standardwürfel figur identisch sind. Alle Würfel figuren werden als einfache schwarz-weiße Strichzeichnungen dargeboten. Während die identischen Figuren der Standardwürfel figur bis auf die Drehung in der Bildebene und Bildtiefe gleichen, handelt es sich bei den Distraktorfiguren um gespiegelte oder leicht veränderte Versionen der Standardfigur. Der MRT ist in zwei Abschnitten zu jeweils 12 Items eingeteilt. Zur Bearbeitung jedes Abschnitts stehen drei Minuten zur Verfügung; dazwischen wird eine kurze Pause eingelegt.

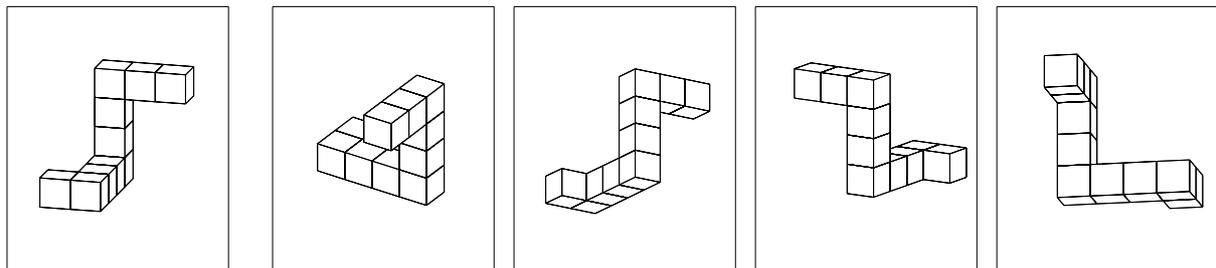


Abbildung 6: Beispiel eines Items aus dem MRT (überarbeitete Version von Peters et al., 1995; Vandenberg & Kuse, 1978). Zur Standardwürfel figur (links) sind zwei Vergleichsfiguren identisch. Dieser Test wurde freundlicherweise von M. Peters zur Verfügung gestellt.

Der computerbasierte mentale Rotationstest (CMR): Die Aufgabe der Probanden war es im CMR, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu entscheiden, ob zwei auf dem Bildschirm präsentierte Würfel figuren identisch oder gespiegelt sind. Als Stimuli waren Figuren ähnlich denen von Shepard und Metzler (1971) realisiert worden (siehe Abbildung 7). Jede Figur bestand aus 10 hellgrünen Würfeln wobei die Komposition der Würfel nach bestimmten Prinzipien erfolgte: (1) Es wurden 4 Arme gebildet, (2) jeder Arm bestand aus mindestens 2 Würfeln, (3) die Arme durften nicht in Kreis- oder C-Form zueinander stehen. Bei der Konstruktion nach diesen Prinzipien ergaben sich 3 Gruppen von möglichen Anordnungen. Aus jeder dieser Gruppen wurden

zufällig 4 Figuren ausgewählt (eine Übersicht aller verwendeten Stimuli findet sich in Anhang A). Die Würfelfiguren waren auf dem Bildschirm etwa 9 cm lang, was bei dem gewählten Abstand zwischen Monitor und Proband von 50 cm einer Länge von etwa 10° Sehwinkel entsprach. Die Figuren wurden vor schwarzem Hintergrund präsentiert.

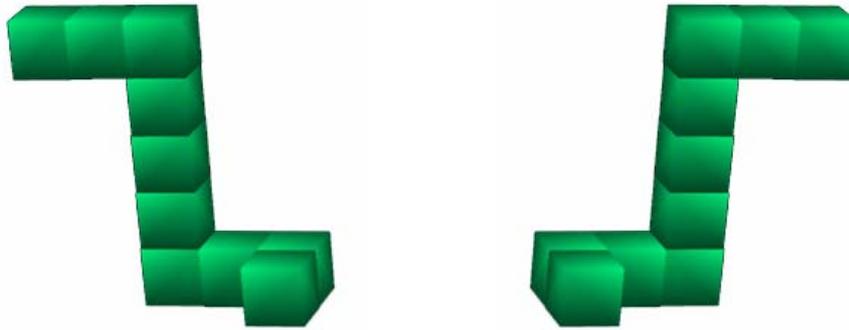


Abbildung 7: Würfelfiguren aus dem CMR. Die Standardfigur (links) wurde mit einer Vergleichsfigur (rechts) präsentiert. Die Vergleichsfigur ist hier eine gespiegelte Version.

Eine Standardfigur wurde auf der linken Bildschirmseite präsentiert und eine Vergleichsfigur, die in 50% der Durchgänge identisch und in 50% gespiegelt war, auf der rechten Seite. Während die Standardfigur immer aufrecht stand (0°), wurde die Vergleichsfigur in unterschiedlichen Winkelstellungen präsentiert. Die Winkeldisparität zwischen den beiden Figuren war entweder 22.5° , 67.5° , 112.5° , 157.5° , 202.5° , 247.5° , 292.5° oder 337.5° in der Bildebene, was Abbildung 8 illustriert. Jede der 12 Vergleichsfiguren wurde zweimal in jeder Winkelstellung vorgegeben – jeweils einmal als identische und einmal als gespiegelte Figur –, wobei niemals zwei gleiche Figuren oder zwei gleiche Winkelstellungen hintereinander präsentiert wurden. Die Anzahl der Durchgänge betrug somit 192.

Der CMR wurde an einem 17" TFT-Monitor durchgeführt. Als Eingabegerät diente eine Computermaus mit 2 Tasten, wobei die linke grün und die rechte rot markiert waren. Zur Programmierung des CMRs wurde die Software *3D GameStudio A6* von Conitec verwendet, die während der Präsentation auch die Zeitmessung mit einer Genauigkeit von ± 0.1 ms ermöglichte.

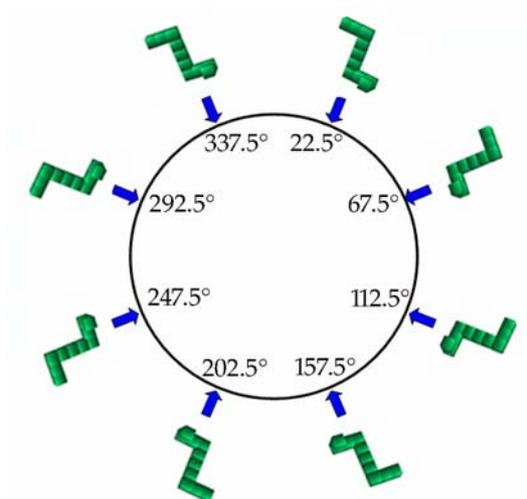


Abbildung 8: Winkelstellungen der Vergleichsfigur. Die Standardfigur wurde immer in der 0°-Stellung präsentiert.

2.1.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch dauerte etwa 35 Minuten und wurde in einem Labor des Instituts für Experimentelle Psychologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden zu zweit getestet. Um Ablenkung zu vermeiden, waren die Versuchspersonen durch Trennwände getrennt und trugen Kopfhörer. Die Daten wurden im Rahmen des Experimentalpraktikums 1 von Studenten im ersten Semester erhoben.

Nach dem Ausfüllen des Fragebogens wurde zuerst der MRT vorgegeben, woraufhin nach einer Pause von 5 Minuten der CMR folgte. Der CMR startete mit einer Übungsphase, die aus 24 Durchgängen mentaler Rotationen bestand. Die Versuchspersonen wurden instruiert, so schnell und mit so wenigen Fehlern wie möglich zu entscheiden, ob die beiden präsentierten Würfelfiguren identisch sind oder ob es sich um gespiegelte Versionen handelt. Im Falle einer „identisch“-Entscheidung sollte die grün markierte Maustaste gedrückt werden, im Falle einer „gespiegelt“-Entscheidung die rot markierte. In der Übungsphase wurden nur Würfelfiguren präsentiert, die in der Experimentalphase nicht vorkamen. Im Gegensatz zur Experimentalphase bekamen die Versuchspersonen in der Übungsphase eine visuelle

Rückmeldung über ihre Antwort („richtig“ in grünen oder „falsch“ in roten Buchstaben). Die 192 Durchgänge der Experimentalphase waren in 4 Blöcke eingeteilt; zwischen den Blöcken wurden die Versuchspersonen aufgefordert, eine Pause einzulegen. Jeder Durchgang startete mit einer 500 ms dauernden Präsentation eines grauen, 5 mm großen Fixationsquadrats in der Mitte des Bildschirms. Direkt danach folgten die beiden Würfelfiguren und die Versuchsperson sollte antworten.

2.1.4 Design und statistische Analyse

Fragebogen: Die Fragebogendaten wurden über alle Versuchspersonen gemittelt. Bivariate Korrelationen zwischen der Computernutzung und der Leistungen im MRT und im CMR wurden berechnet.

MRT: Für jede Versuchsperson wurde die Gesamtpunktzahl berechnet. Ein Punkt wurde gegeben, wenn beide identischen Würfelfiguren korrekt gewählt wurden. Die höchstmögliche Punktzahl lag bei 24. Eine univariate Varianzanalyse mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht wurde gerechnet.

CMR: Als abhängige Variablen wurden die Reaktionszeit (RT) bis zur „identisch“/„gespiegelt“-Entscheidung sowie die Fehlerrate in Prozent erhoben. Für die statistische Analyse der RT wurden nur identische Durchgänge, die korrekt beantwortet wurden, verwendet (siehe Shepard & Metzler, 1971). Dabei wurden für jede Versuchsperson getrennt die Mittelwerte für die folgenden vier Winkeldisparitäten berechnet: 22.5° (22.5° und 337.5°), 67.5° (67.5° und 292.5°), 112.5° (112.5° und 247.5°) und 157.5° (157.5° und 202.5°). Bei der Berechnung dieser Mittelwerte wurden für jede Versuchsperson innerhalb jeder Winkeldisparität sowohl RTs oberhalb zwei Standardabweichungen über dem Mittelwert als auch RTs unterhalb 500 ms als Ausreißer betrachtet und von der statistischen Analyse ausgeschlossen. Auch die Fehleraten wurden für jede Winkeldisparität berechnet, wobei Fehler in identischen und gespiegelten Durchgängen addiert wurden. Zudem wurde die Gesamtfehlerrate berechnet.

Es wurden zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung gerechnet². Gruppen-Faktor war dabei das Geschlecht und messwiederholter Faktor die Winkeldisparität. Um die Reaktionszeiten detaillierter zu analysieren, wurde für jede Versuchsperson zudem die Regressionsgerade (nach der Methode der kleinsten Quadrate) zwischen der Winkeldisparität und den RTs berechnet. Die Steigung der Regressionsgeraden (Regressionskoeffizient) wurde über alle Versuchspersonen hinweg gemittelt. Es wurden univariate Varianzanalysen mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht und der Steigung als abhängiger Variable gerechnet.

Korrelationen zwischen MRT und CMR: Es wurden Korrelationen zwischen den Punktwerten des MRTs und sowohl den RTs als auch den Fehlerraten im CMR sowie den Steigungen der Regressionsgeraden berechnet.

2.2 Ergebnisse

Fragebogen: 96 Versuchspersonen gaben an, Rechtshänder zu sein; 6 klassifizierten sich als Linkshänder. 83 Versuchspersonen waren Studierende, 48 davon im Fach Psychologie. Die restlichen 19 Teilnehmer waren Schüler oder beruflich tätig. Eine Versuchsperson gab an, nie am Computer zu arbeiten, 49 gaben eine Stunde pro Tag, 43 zwei Stunden pro Tag, 3 drei Stunden pro Tag und 5 fünf Stunden pro Tag an. Die Computernutzung korrelierte weder mit der Leistung im MRT ($r = .001, p = .99$) noch im CMR (RT: $r = .18, p = .08$; Fehlerrate: $r = -.03, p = .75$).

MRT: Die mittlere Punktzahl im MRT lag bei 12.51 ($SD = 4.90$). Nach Geschlecht getrennt ergaben sich folgende Punktwerte: Männer 14.27 ($SD = 4.80$) und Frauen 10.75 ($SD = 4.59$). Diese Punktwerte erwiesen sich als signifikant verschieden, $F(1,100) = 15.10, p < .001, \eta^2 = .13$.

CMR (RT): Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die RTs, $F(3,300) = 286.43, p < .001, \eta^2 = .74$. Wiederholte Kontraste zeigten, dass sich jede Win-

² Signifikanzniveaus aller ANOVA-Ergebnisse in diesem und in den folgenden Experimenten wurden nach der Greenhouse-Geisser-Methode korrigiert.

keldisparität zur nächst höheren signifikant unterschied. Außerdem zeigte sich ein signifikanter Effekt des Geschlechts, $F(1,100) = 7.68$, $p < .05$, $\eta^2 = .07$. Wie in Abbildung 9 illustriert, waren die Frauen langsamer als die Männer. Die Interaktion zwischen Winkeldisparität und Geschlecht erwies sich als nicht signifikant, $F(3,300) = 1.68$, $p = .20$, $\eta^2 = .02$.

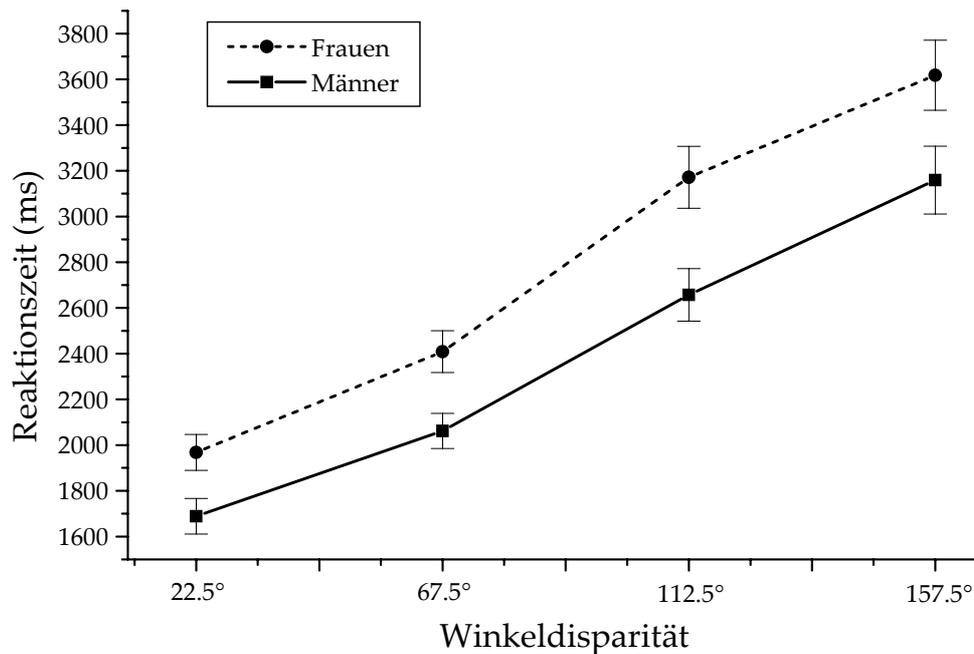


Abbildung 9: Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die Steigung der Regressionsgeraden gemittelt über alle Versuchspersonen lag bei 11.91 ms/Grad, was einer mentalen Rotationsgeschwindigkeit von 83.96°/s entspricht. Die Steigung der Männer (11.13 ms/Grad) unterschied sich nicht signifikant von der Steigung der Frauen (12.70 ms/Grad), $F(1,100) = 1.60$, $p = .20$, $\eta^2 = .02$.

CMR (Fehler): Die Gesamtfehlerrate lag bei 11.84% ($SE = 0.83$). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate, $F(3,300) = 96.63$, $p < .001$, $\eta^2 = .50$, wobei wiederholte Kontraste signifikante Unterschiede zwischen allen Winkeldisparitäten zeigten. Frauen begingen mehr Fehler als Männer, $F(1,100) = 11.63$, $p < .05$, $\eta^2 = .10$ (siehe Tabelle 1). Es wurde eine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Winkeldisparität gefunden, $F(3,300) = 3.19$, $p < .05$, $\eta^2 = .03$. Die Differenz der Fehlerrate zwischen den Geschlechtern war bei der größten Winkeldisparität am höchsten.

Tabelle 1

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Männer und Frauen. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Männer	1.05 (0.18)	1.84 (0.24)	2.78 (0.24)	3.49 (0.34)
Frauen	2.11 (0.26)	2.80 (0.35)	4.13 (0.37)	5.48 (0.48)

Korrelation zwischen MRT und CMR: Der Punktwert im MRT korrelierte signifikant mit der RT ($r = -.43, p < .001$) und mit der Fehlerrate im CMR ($r = -.36, p < .001$). Je besser ein Proband im MRT abschnitt, desto schneller und fehlerfreier reagierte er im CMR. Es unterschieden sich die Geschlechter: Während der Punktwert im MRT mit der RT im CMR für Männer ($r = -.44, p < .05$) und Frauen ($r = -.31, p < .05$) korrelierte, korrelierte er mit der Fehlerrate im CMR nur für die Frauen ($r = -.46, p < .001$) und nicht für die Männer ($r = -.06, p = .70$). In Bezug auf die Regressionsgeraden betrug die Korrelation zwischen dem MRT-Wert und der Steigung $r = -.19$ ($p = .05$). Der Punktwert im MRT korrelierte mit der Steigung im CMR für die Männer ($r = -.36, p < .05$), aber nicht für die Frauen ($r = .04, p = .79$).

2.3 Diskussion

Die Ergebnisse des ersten Experiments zeigten eine konstant ansteigende Funktion zwischen den Reaktionszeiten und der Winkeldisparität im computerbasierten mentalen Rotationstest. Diese Beziehung entspricht den Befunden aus früheren Studien zur mentalen Rotation, allen voran der klassischen Studie von Shepard und Metzler (1971) und lässt darauf schließen, dass die Versuchspersonen mental rotierten, um die Aufgabe zu lösen. Neben den Reaktionszeiten stiegen auch die Fehlerraten mit steigender Winkeldisparität an. Um die Daten der Reaktionszeiten genauer zu untersuchen, wurden Regressionsgeraden zwischen der Reaktionszeit und der Winkeldisparität für jede Versuchsperson gebildet und die Steigungen gemittelt. Die Geschwindigkeit der mentalen Rotation gemittelt über alle Versuchspersonen (als in-

vertierter Wert der Steigung der Regressionsgerade) lag bei $83.96^\circ/\text{s}$ und damit im Bereich der Studie von Shepard und Metzler ($60^\circ/\text{s}$).

In Bezug auf Geschlechtseffekte konnte die Annahme bestätigt werden, dass Männer im MRT eine bessere Leistung als Frauen zeigen. Dasselbe Ergebnis wurde auch im CMR gefunden, wobei die Effektgröße im MRT höher war als im CMR. Die Steigung im CMR unterschied sich nicht zwischen Männern und Frauen. Frauen waren demnach in ihrer mentalen Rotationsgeschwindigkeit nicht langsamer als Männer. Da sie jedoch in den Reaktionszeiten langsamer waren, ist davon auszugehen, dass sie länger für andere beteiligte Prozesse wie der Enkodierung oder der Speicherung der Stimuli brauchten.

Die Reaktionszeiten wie auch die Fehlerrate im CMR korrelierten signifikant mit den Punktwerten im MRT. Je besser Probanden im MRT abschnitten, desto schneller und genauer waren sie im CMR. Die Punktwerte im MRT korrelierten nur schwach mit der Steigung der Regressionsgeraden. Der MRT könnte demnach stark von Prozessen beeinflusst sein, die sich vom mentalen Rotationsprozess an sich unterscheiden. Im CMR dagegen lässt sich zusätzlich zu den Reaktionszeiten und der Fehlerrate auch die mentale Rotationsgeschwindigkeit angeben. Somit kann der CMR den spezifischen Einfluss auf die mentale Rotation an sich abbilden.

Es lässt sich zusammenfassen, dass der computerbasierte mentale Rotationstest die mentale Rotationsfähigkeit misst. Er korreliert hoch mit dem MRT, einem Papier- und Bleistift-Test, mit dem seit Jahren die mentale Rotationsfähigkeit erfasst wird. Der computerbasierte mentale Rotationstest bietet einige Vorteile gegenüber dem MRT. Es kann zwischen Reaktionszeiten und Fehlern unterschieden werden und es können spezifische Prozesse durch die systematische Variation der Winkeldisparitäten aufgezeigt werden. Der computerbasierte mentale Rotationstest sollte demnach potentielle Effekte eines Trainings der mentalen Rotation abbilden können. Zudem ist es möglich, den Effekt eines Trainings auf einzelne Objekte nachzuweisen, was Aussagen über die Objektspezifität ermöglicht.

3 Experiment 2

In Experiment 2 wurde der Einfluss eines computerbasierten manuellen Trainings auf die mentale Rotationsfähigkeit untersucht. Es wurde angenommen, dass ein manuelles Training die mentale Rotationsfähigkeit verbessert. Um potentielle Trainingseffekte genauer zu analysieren, wurden im Posttest der mentalen Rotation die Reaktionszeiten unterschieden für Objekte, die im Training gelernt wurden und neue, nicht gelernte Objekte. Es wurde vermutet, dass ein potentieller Trainingseffekt nicht auf Stimuli beschränkt ist, die im Training gelernt wurden. Des Weiteren wurde untersucht, ob Versuchspersonen mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit in einem höheren Maße von einem manuellen Training profitieren als Versuchspersonen mit guter Rotationsfähigkeit. Geschlechtsabhängige Trainingseffekte wurden nicht erwartet.

3.1 Methode

3.1.1 Stichprobe

Es nahmen 67 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 45 Jahren teil, von denen 33 weiblich waren. Keine der Versuchspersonen hatte in Experiment 1 teilgenommen. Drei Teilnehmer wurden aus der Datenanalyse ausgeschlossen, da ihre Fehlerrate im computerbasierten mentalen Rotationstest über 40% lag. Die berichteten Ergebnisse basieren somit auf 64 Versuchspersonen ($M = 25.19$ Jahre, $SD = 6.10$), wovon die Hälfte weiblich war.

3.1.2 Versuchsaufbau

Fragebogen: Auf einem Fragebogen wurden Alter, Händigkeit, Geschlecht, Studienfach beziehungsweise Beruf, die Computernutzung (0-1 Stunde/Tag, 1-3 Stunden/Tag, mehr als 3 Stunden/Tag), die Häufigkeit von Computerspielen (nie, ein- bis zweimal/Woche, drei- bis siebenmal/Woche, mehr als siebenmal/Woche) und die Joystickvorerfahrung (keine, geringe, erfahren) erfasst.

Der computerbasierte mentale Rotationstest (CMR) aus Experiment 1 wurde als Posttest verwendet. Eine parallele Version des CMRs wurde entwickelt und diente als Prätest. Die Prätest-Version glich dem CMR Posttest bis auf die Anzahl der Stimuli: Jeweils zwei Würfelfiguren wurden zufällig aus den in Experiment 1 beschriebenen drei Gruppen ausgewählt, woraus eine Anzahl von 6 Würfelfiguren und somit insgesamt 96 Durchgänge resultierten. Der Prätest bestand daher aus halb so vielen Durchgängen wie der Posttest. Die Würfelfiguren des Prätests waren nicht identisch mit den CMR-Figuren, die im Posttest verwendet wurden (siehe Anhang A).

Das computerbasierte manuelle Rotationstraining: Als Training der mentalen Rotation wurde eine computerbasierte manuelle Rotationsaufgabe programmiert. Die Präsentation der Figuren glich dabei der im CMR: Eine Standardfigur wurde auf der linken Seite des Bildschirms gezeigt und eine Vergleichsfigur auf der rechten. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, die räumliche Lage der Vergleichsfigur durch eine Rotation so einzustellen, dass sie der räumlichen Lage der Standardfigur entsprach. Das Stimulusmaterial des manuellen Trainings bestand aus 12 Würfelfiguren. Sechs dieser Figuren glichen den im CMR verwendeten Figuren bis auf eine Ausnahme: Um die Schwierigkeit zu erhöhen, bestanden diese aus 5 Armen. Die restlichen 6 Figuren waren aus dem CMR Posttest entnommen worden. Das Training bestand demnach aus 6 Figuren, die im darauf folgenden CMR Posttest wieder präsentiert wurden. Anders ausgedrückt bestand der CMR Posttest aus 6 „alten“ und 6 „neuen“ Figuren. Eine komplette Übersicht der verwendeten Stimuli findet sich in Anhang A. Im manuellen Training gab es nur identische Durchgänge und die Figuren konnten nur in der Bildebene rotiert werden. Die Winkeldisparitäten zwischen den beiden zusammen präsentierten Figuren waren identisch mit denen im CMR. Jede Würfelfigur wurde zweimal in jeder der acht Winkeldisparitäten präsentiert (aber niemals direkt hintereinander), woraus eine Gesamtanzahl von 192 Durchgängen resultierte. Die Vergleichsfigur konnte mittels eines Joysticks gedreht werden. Die Drehung der Vergleichsfigur in der Bildebene war die einzig mögliche Bewegung. Der Joystick war in eine Pappbox eingebaut. Dadurch „stand“ er horizontal und konnte so in die Hand genommen werden, als würde man die Würfelfigur für eine Rotation in der Bildebene real in die Hand nehmen (siehe Abbildung 10). Bei Drehung des Joysticks

nach rechts/links drehte sich entsprechend die Vergleichsfigur nach rechts/links. Je nach dem wie stark man den Joystick ausrichtete, änderte sich die Geschwindigkeit, wobei sie höchstens $60^\circ/s$ betragen konnte.



Abbildung 10: Stimuluspräsentation und Aufbau des manuellen Trainings.

Computerquiz: Das Computerquiz „Wer wird Millionär?“ wurde verwendet. In diesem Quiz stellt der virtuelle Quizmaster eine Frage, woraufhin die Versuchsperson sich für die richtige Antwort aus vier vorgegebenen Antwortmöglichkeiten entscheiden muss. Die Schwierigkeit steigt von einer Frage zur nächsten. Die Versuchsperson bekommt rückgemeldet, ob die Wahl der Antwort richtig war. Bei einer falschen Antwort begann das Spiel automatisch von neuem. Die Antworten wurden per Anklicken mit der Computermaus gegeben. Die Fragen werden sowohl visuell auf dem Bildschirm als auch auditiv über Kopfhörer präsentiert. Um sicherzustellen, dass die Versuchspersonen die Aufgabe ernst nahmen und sich anstrebten, wurde ihnen gesagt, dass ihr Allgemeinwissen getestet würde. Das Quiz wurde verwendet, da es keinerlei räumlich-kognitive Anforderungen stellt.

Das Experiment wurde an einem 17" TFT-Monitor durchgeführt. Die Versuchspersonen saßen im Abstand von etwa 50 cm vor dem Monitor. Als Eingabegeräte dien-

ten eine Computermaus mit 2 Tasten, wobei die linke grün und die rechte rot markiert waren, sowie ein *Microsoft Sidewinder Precision* Joystick, der in eine Pappbox eingebaut und dessen Feuerknopf grün markiert war. Zur Programmierung des CMRs und des Trainings war die Software *3D GameStudio A6* von *Conitec* verwendet worden, die während der Präsentation auch die Zeitmessung mit einer Genauigkeit von ± 0.1 ms ermöglichte.

3.1.3 Versuchsdurchführung

Das Experiment dauerte etwa 60 Minuten und fand in einem Labor des Instituts für Experimentelle Psychologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf statt. Die Versuchspersonen wurden zu zweit getestet und erhielten für ihre Teilnahme 6 Euro. Um Ablenkung zu vermeiden, waren die Versuchspersonen durch Trennwände getrennt und trugen Kopfhörer. Jeweils eine Versuchsperson wurde zufällig zur Experimentalgruppe (EG; 16 Männer und 16 Frauen) und die andere zur Kontrollgruppe (KG; 16 Männer und 16 Frauen) zugeordnet. Nach dem Ausfüllen des Fragebogens folgte der CMR Prätest, dem eine Übungsphase mit 24 Durchgängen vorangestellt war (siehe Experiment 1). Danach führte die EG das manuelle Training durch; die KG spielte gleichzeitig und gleich lang das Computerquiz. Den Probanden der EG wurde ausführlich die Handhabung des Joysticks erklärt, bevor sie instruiert wurden, dass sie schnellstmöglich die Vergleichsfigur in dieselbe räumliche Lage wie die Standardfigur bringen und abschließend den grün markierten Feuerknopf drücken sollten. Um zu verhindern, dass Versuchspersonen sich zeitlich zu lange mit der Feinjustierung beschäftigen würden, wurden sie aufgeklärt, dass sie nicht exakt dieselbe Winkelstellung herstellen mussten. Bei einer Abweichung von mehr als $\pm 15^\circ$ erschien eine Fehler-Rückmeldung in Form der Präsentation des Wortes „falsch“ in roten Buchstaben. Die Interventionsphase dauerte im Mittel 22 Minuten. Nach dem manuellen Training beziehungsweise dem Computerquiz führten alle Versuchspersonen den CMR Posttest durch.

3.1.4 Design und statistische Analyse

Fragebogen: Die Fragebogendaten wurden über alle Versuchspersonen gemittelt beziehungsweise die Häufigkeiten errechnet. Es wurden univariate Varianzanalysen für die abhängigen Variablen RT und Fehlerrate im Prätest und Rotationszeit und Fehlerrate im manuellen Training berechnet. Gruppen-Faktoren waren die Computernutzung (0-1 Stunde/Tag, 1-3 Stunden/Tag, mehr als 3 Stunden/Tag), die Häufigkeit von Computerspielen (nie, ein- bis dreimal/Woche, drei- bis siebenmal/Woche, mehr als siebenmal/Woche) und die Joystickvorerfahrung (keine, geringe, erfahren).

Abhängige Variablen im CMR Prä- und Posttest: Abhängige Variablen waren die RTs bis zur „identisch“/„gespiegelt“-Entscheidung und die Fehlerrate. Beide Variablen wurden wie in Experiment 1 beschrieben berechnet; mit Ausreißern wurde wie in Experiment 1 dargestellt verfahren.

Fähigkeit der mentalen Rotation: Die Daten des CMR Prätests wurden analysiert, um die mentale Rotationsfähigkeit zu erfassen. Es wurden zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die RT und die Fehlerrate gerechnet. Gruppen-Faktor war das Geschlecht und messwiederholter Faktor die Winkeldisparität. Außerdem wurde getrennt für jede Versuchsperson eine Regressionsgerade (Methode der kleinsten Quadrate) zwischen den RTs und der Winkeldisparität berechnet und die Steigung (Regressionskoeffizient) über alle Versuchspersonen hinweg gemittelt. Es wurde eine univariate Varianzanalyse mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht und der Steigung als abhängiger Variable gerechnet.

Trainingseffekte: Für jede Versuchsperson wurden Differenzwerte zwischen Prätest und Posttest für die RTs und die Fehlerraten gebildet. Zur Berechnung der RT-Differenzwerte wurden getrennt für jede der vier Winkeldisparitäten die Prätestwerte von den Posttestwerten subtrahiert. Auch in Bezug auf die Fehler-Differenzwerte wurden getrennt für jede Winkeldisparität die Fehlerraten im Prätest von den Fehlerraten im Posttest subtrahiert. Potentielle Trainingseffekte wurden durch einen Vergleich dieser Differenzwerte zwischen der EG und der KG analysiert. Um die Objektspezifität zu untersuchen wurde zudem zwischen den Differenzwerten von „al-

ten“ und „neuen“ Objekten im Posttest unterschieden. Auf Basis der im Prätest ermittelten RTs wurden sowohl die EG als auch die KG *post hoc* durch einen *Median-Split* in Bezug auf ihre Leistung getrennt, wobei vier gleichgroße Gruppen entstanden: gute mentale Rotierer aus der EG, gute aus der KG, schlechte aus der EG und schlechte aus der KG. Es wurden mehrfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die RT- und die Fehler-Differenzwerte gerechnet. Als Gruppen-Faktoren wurden Gruppe (EG vs. KG), Geschlecht und mentale Rotationsfähigkeit definiert, als messwiederholte Faktoren Winkeldisparität (22.5°, 67.5°, 112.5°, 157.5°) und Art der Objekte („alte“ vs. „neue“). Des Weiteren wurden für den CMR Posttest Regressionsgeraden (Methode der kleinsten Quadrate) zwischen den RTs und der Winkeldisparität getrennt für jede Versuchsperson berechnet. Um potentielle Trainingseffekte zu untersuchen, wurden die Steigungen gemittelt. Es wurde eine univariate Varianzanalyse gerechnet mit der Gruppe, dem Geschlecht und der mentalen Rotationsfähigkeit als Gruppen-Faktoren, der Steigung im CMR Posttest als abhängiger Variable und der Steigung im Prätest als Kovariate. Um die Objektspezifität näher zu untersuchen, wurden die Steigungen der Regressionsgeraden des Posttests zusätzlich abhängig von der Art der Objekte gemittelt. Separat für „alte“ und „neue“ Objekte wurden univariate Varianzanalysen mit dem Gruppen-Faktor Gruppe, der Steigung im Posttest als abhängiger Variable und der Steigung im Prätest als Kovariate gerechnet.

Leistung im manuellen Training: Vergleichbar zum CMR wurden im manuellen Training getrennt für die vier Winkeldisparitäten die Rotationszeit und die Fehlerrate (wobei ein Fehler als Abweichung um +/-15° von der korrekten Position definiert war) erhoben. In die Berechnung der Rotationszeit-Mittelwerte gingen nur korrekt rotierte Durchgänge ein und es wurden pro Versuchsperson für jede der vier Winkeldisparitäten Rotationszeiten über zwei Standardabweichungen oberhalb des Mittelwerts als Ausreißer betrachtet und von der statistischen Analyse ausgeschlossen. Es wurden zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung gerechnet. Gruppen-Faktor war dabei das Geschlecht, messwiederholter Faktor die Winkeldisparität (22.5°, 67.5°, 112.5°, 157.5°) und die abhängigen Variablen die Rotationszeit und die Fehlerrate. Zudem wurde die rotierte Distanz in Winkelgrad für jede einzel-

ne Rotation erfasst. Für jeden Durchgang wurde dafür die gedrehte Distanz in die richtige Richtung (entsprechend dem kürzesten Weg) und in die falsche Richtung (entsprechend dem längeren Weg) erhoben. Getrennt für jede Winkeldisparität wurden pro Versuchsperson sowohl die richtig gedrehte als auch die falsch gedrehte Distanz gemittelt. Eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht und den messwiederholten Faktoren Winkeldisparität und Richtung (richtig vs. falsch) wurde gerechnet. Außerdem wurden getrennt für jede Versuchsperson Regressionsgeraden zwischen der Winkeldisparität und Rotationszeit errechnet und die Steigungen über alle Versuchspersonen gemittelt. Es wurde eine univariate Varianzanalyse mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht und der Steigung als abhängiger Variable gerechnet.

Zusammenhang zwischen mentaler und manueller Rotation: Für die EG wurden Korrelationen zwischen den RTs des CMR Prä- und Posttests und den Rotationszeiten sowie der rotierten Distanz des manuellen Trainings berechnet. Des Weiteren wurden die Steigungen des CMRs mit den Steigungen im manuellen Training korreliert.

3.2 Ergebnisse

Fragebogen: 62 Versuchspersonen gaben an, Rechtshänder zu sein; 2 klassifizierten sich als Linkshänder. 58 Versuchspersonen waren Studierende, 24 davon im Fach Psychologie. Die restlichen 6 Teilnehmer waren beruflich tätig. 24 Versuchspersonen gaben an, höchstens eine Stunde täglich am Computer zu arbeiten. 26 Versuchspersonen nutzten den Computer zwischen einer und drei Stunden täglich und 14 Teilnehmer mehr als drei Stunden täglich. Bei der Häufigkeit von Computerspielen in der Woche machten die Versuchspersonen folgende Angaben: 41 nie, 12 zwischen ein- und zweimal, 8 zwischen drei- bis siebenmal und 3 Versuchspersonen häufiger als siebenmal. 19 Versuchspersonen hatten noch nie mit einem Joystick gespielt, 30 hatten schon wenige Male damit gespielt und 14 bezeichneten sich als joystickerfahren. Keine der computerbezogenen Variablen hatte einen Einfluss auf die Leistungen im CMR oder im manuellen Training.

Mentale Rotationsfähigkeit (RT): Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Effekt auf die RTs im CMR Prätest, $F(3,186) = 146.00$, $p < .001$, $\eta^2 = .70$. Wiederholte Kontraste zeigten, dass sich jeder Winkel vom nächst höheren unterschied. Männer und Frauen unterschieden sich nicht in ihren RTs, $F(1,62) = 0.24$, $p = .62$, $\eta^2 < .01$, was in der Abbildung 11 sichtbar wird. Die Winkeldisparität und das Geschlecht interagierten nicht miteinander, $F(3,186) = 0.60$, $p = .55$, $\eta^2 < .01$.

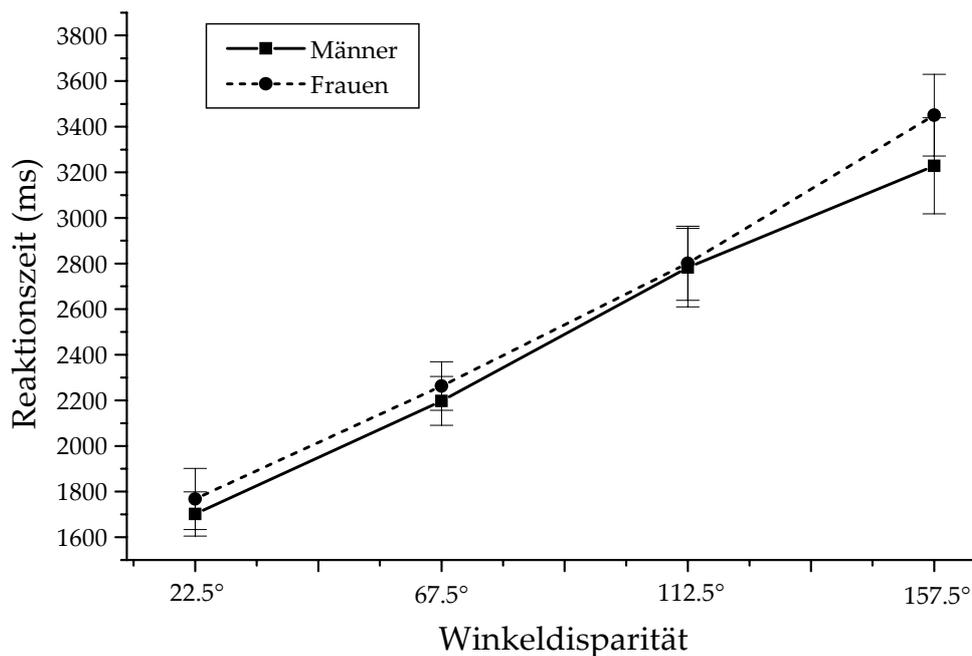


Abbildung 11: Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die gemittelte Steigung der Regressionsgeraden lag bei 11.95 ms/Grad ($86.68^\circ/s$). Männer und Frauen unterschieden sich nicht in der Steigung (Männer 11.48 ms/Grad, Frauen 12.42 ms/Grad, $F(1,62) = 0.40$, $p = .40$, $\eta^2 < .01$).

Mentale Rotationsfähigkeit (Fehler): Die Fehlerrate lag im CMR Prätest bei 12.39%. Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate, $F(3,186) = 53.53$, $p < .001$, $\eta^2 = .46$. Wiederholte Kontraste zeigten Unterschiede zwischen allen aufeinander folgenden Winkeldisparitäten. Frauen und Männer unterschieden sich nicht in der Fehlerrate, $F(1,62) = 0.47$, $p = .50$, $\eta^2 < .01$. In Tabelle 2 ist die Fehlerrate in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht aufgeführt.

Tabelle 2

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Männer und Frauen. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Männer	0.84 (0.18)	2.22 (0.40)	3.77 (0.46)	4.89 (0.65)
Frauen	1.21 (0.28)	2.34 (0.39)	3.97 (0.51)	5.53 (0.64)

Trainingseffekte (RT): Die RT-Differenzwerte unterschieden sich signifikant zwischen der EG und der KG, $F(1,56) = 9.57$, $p < .05$, $\eta^2 = .15$. Wie in Abbildung 12 ersichtlich wird, waren die RT-Trainingseffekte für die EG größer als für die KG. Es gab weder einen Effekt der Winkeldisparität auf die RT-Differenzwerte, $F(3,168) = 2.66$, $p = .09$, $\eta^2 = .05$, noch des Geschlechts, $F(1,56) = 0.003$, $p = .95$, $\eta^2 < .01$. Die Winkeldisparität interagiere zudem weder mit der Gruppe, $F(3,168) = 0.72$, $p = .47$, $\eta^2 = .01$, noch mit dem Geschlecht, $F(3,168) = 0.61$, $p = .52$, $\eta^2 = .01$.

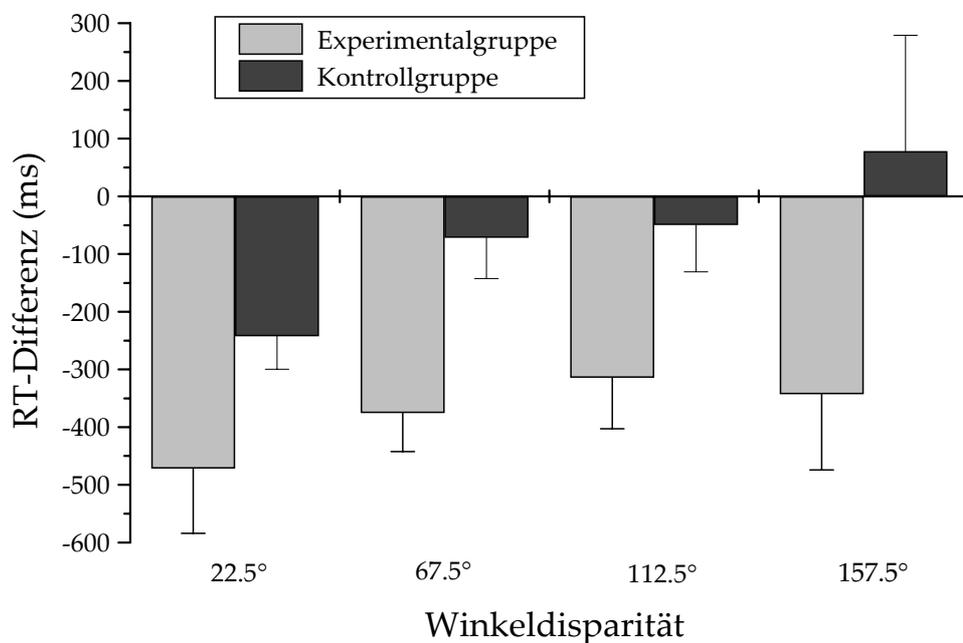


Abbildung 12: RT-Differenzwerte für die Experimental- und die Kontrollgruppe abhängig von der Winkeldisparität. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die RT-Differenzwerte unterschieden sich signifikant zwischen „alten“ und „neuen“ Objekten, $F(1,56) = 18.14$, $p < .001$, $\eta^2 = .25$. Art der Objekte und Gruppe interagierten dabei signifikant, $F(1,56) = 12.48$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$. Während sich die Differenzwerte für „neue“ Objekte nicht zwischen der EG und der KG unterschieden, war dies der Fall für die „alten“ Objekte (siehe Abbildung 13). Wie außerdem in Abbildung 13 ersichtlich wird, unterschieden sich die Differenzwerte auch zwischen „alten“ und „neuen“ Objekten für die Kontrollgruppe (Diskussion siehe Abschnitt 6.4.1.1). Des Weiteren ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen der Winkeldisparität und Art der Objekte, $F(3,168) = 6.90$, $p < .05$, $\eta^2 = .11$. Wiederholte Kontraste zeigten dabei einen signifikanten Unterschied zwischen „alten“ und „neuen“ Objekten nur bei den Winkeldisparitäten 112.5° und 157.5°.

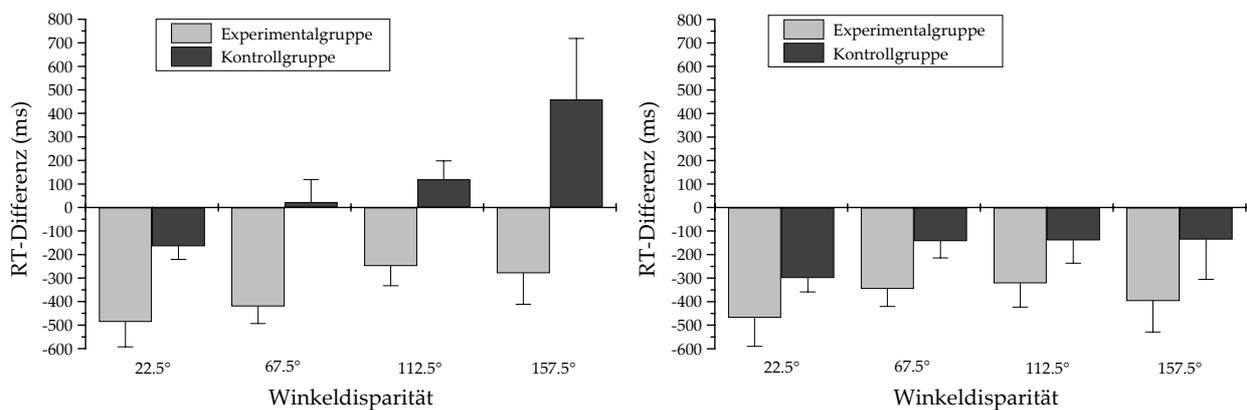


Abbildung 13: RT-Differenzwerte für die Experimental- und die Kontrollgruppe abhängig von der Winkeldisparität. Die linke Abbildung illustriert die Daten für „alte“ Objekte, die rechte die Daten für „neue“ Objekte. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

In Bezug auf die mentale Rotationsfähigkeit wurden *post hoc* vier Gruppen mit folgenden Mittelwerten im CMR Prätest zusammengestellt: gute mentale Rotierer aus der EG ($M = 2006.85$ ms, $SE = 75.65$; 10 Männer und 6 Frauen), gute mentale Rotierer aus der KG ($M = 1975.66$ ms, $SE = 71.61$; 9 Männer, 7 Frauen), schlechte mentale Rotierer aus der EG ($M = 2994.77$ ms, $SE = 168.36$; 6 Männer, 10 Frauen) und schlechte mentale Rotierer aus der KG ($M = 3118.89$ ms, $SE = 180.61$; 7 Männer, 9 Frauen). Gute und schlechte mentale Rotierer unterschieden sich signifikant in ihren RT-Differenzwerten, $F(1,56) = 6.49$, $p < .05$, $\eta^2 = .10$. Die Interaktion zwischen mentaler

Rotationsfähigkeit und Gruppe erwies sich als nicht signifikant, $F(1,56) = 1.82$, $p = .18$, $\eta^2 = .03$. Die mentale Rotationsfähigkeit agierte signifikant mit der Art der Objekte, $F(1,56) = 5.58$, $p < .05$, $\eta^2 = .09$, was in Abbildung 14 illustriert ist.

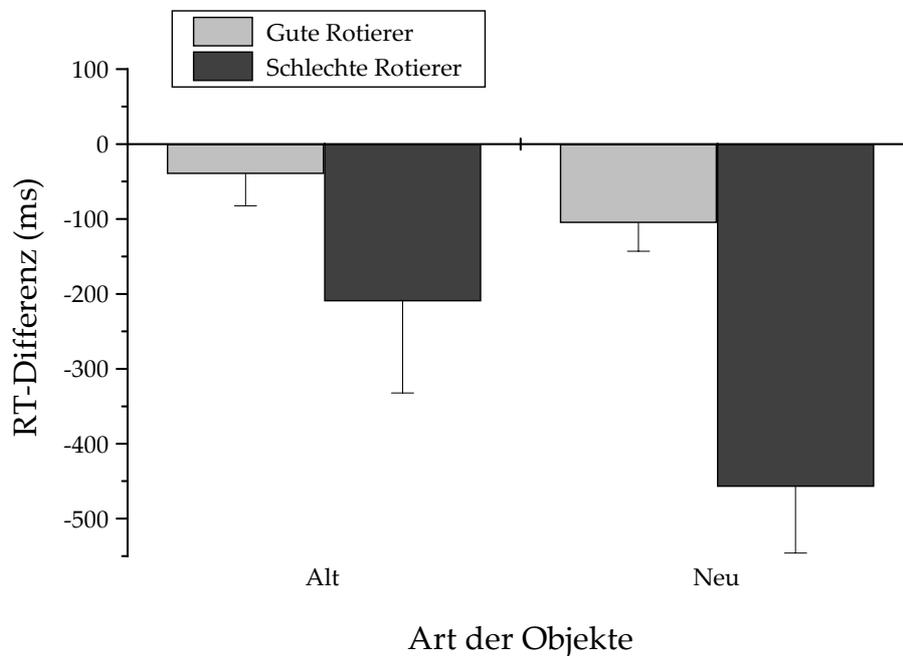


Abbildung 14: RT-Differenzwerte für gute und schlechte mentale Rotierer und getrennt für „alte“ und „neue“ Objekte. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die Steigung der Regressionsgeraden im Posttest unterschied sich – unter Berücksichtigung der Steigung im Prätest als Kovariate – nicht zwischen der EG und der KG, $F(1,55) = 1.61$, $p = .21$, $\eta^2 = .03$. Das Geschlecht hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Steigung im Posttest, $F(1,55) = 0.24$, $p = .62$, $\eta^2 < .01$. Die Interaktion zwischen dem Geschlecht und der Gruppe erwies sich als nicht signifikant, $F(1,55) = 0.02$, $p = .89$, $\eta^2 < .01$. Dagegen beeinflusste die mentale Rotationsfähigkeit die Steigung im Posttest, $F(1,55) = 4.20$, $p < .05$, $\eta^2 = .07$ (siehe Tabelle 3). Es gab jedoch keine Interaktion zwischen der mentalen Rotationsfähigkeit und der Gruppe, $F(1,55) = 1.30$, $p = .26$, $\eta^2 = .02$. Die Steigung der Regressionsgeraden im Posttest für „alte“ Objekte unterschied sich nicht in Abhängigkeit von der Gruppe, $F(1,61) = 2.01$, $p = .10$, $\eta^2 = .05$. Dasselbe galt für „neue“ Objekte, $F(1,61) = 1.07$, $p = .31$, $\eta^2 = .02$. Die Steigungen der Regressionsgeraden sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3

Steigungen der Regressionsgeraden (in ms/Grad) des CMR Posttests in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit und getrennt für „alte“ und „neue“ Objekte sowie für gute und schlechte mentale Rotierer.

	„alte“ Objekte	„neue“ Objekte	Gute Rotierer	Schlechte Rotierer
Experimentalgruppe	12.99	11.75	9.80	14.65
Kontrollgruppe	17.05	13.77	10.17	19.55

Trainingseffekte (Fehler): Die Fehler-Differenzwerte unterschieden sich nicht zwischen der EG und der KG, $F(1,56) = 1.30$, $p = .26$, $\eta^2 = .02$. Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Effekt auf die Fehler-Differenzwerte, $F(3,168) = 3.20$, $p < .05$, $\eta^2 = .05$, wobei die gerechneten wiederholten Kontraste keine signifikanten Unterschiede aufdeckten. Des Weiteren interagierte die Winkeldisparität mit der Gruppe, $F(3,168) = 2.79$, $p < .05$, $\eta^2 = .05$. Tabelle 4 zeigt die Fehler-Differenzwerte getrennt für die EG und die KG und abhängig von der Winkeldisparität. Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf die Fehler-Differenzwerte, $F(1,56) = 0.36$, $p = .55$, $\eta^2 < .01$. Die Fehler-Differenzwerte unterschieden sich nicht zwischen guten und schlechten mentalen Rotierern, $F(1,56) = 0.01$, $p = .94$, $\eta^2 < .01$, oder zwischen „alten“ und „neuen“ Objekten, $F(1,56) = 1.51$, $p = .22$, $\eta^2 = .03$.

Tabelle 4

Fehler-Differenzwerte in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und getrennt für EG und KG. Negative Werte bedeuten niedrigere Fehlerraten im CMR Posttest. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Experimentalgruppe	-0.41 (0.22)	0.18 (0.27)	-0.60 (0.42)	-1.73 (0.44)
Kontrollgruppe	-0.39 (0.26)	-1.14 (0.37)	-1.60 (0.51)	-1.11 (0.48)

Leistung im manuellen Training (Rotationszeit): Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die Rotationszeit, $F(3,90) = 853.63$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$. Wiederholte Kontraste deckten signifikante Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Winkeln auf. Männer und Frauen unterschieden sich in der Rotationszeit, $F(1,30) = 6.49$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$ (siehe Abbildung 15). Die gemittelte Steigung betrug 23.00 ms/Grad (43.48°/s). Die Steigung der Männer (22.04 ms/Grad) unterschied sich nicht von der Steigung der Frauen (23.95 ms/Grad), $F(1,30) = 3.48$, $p = .07$, $\eta^2 = .10$.

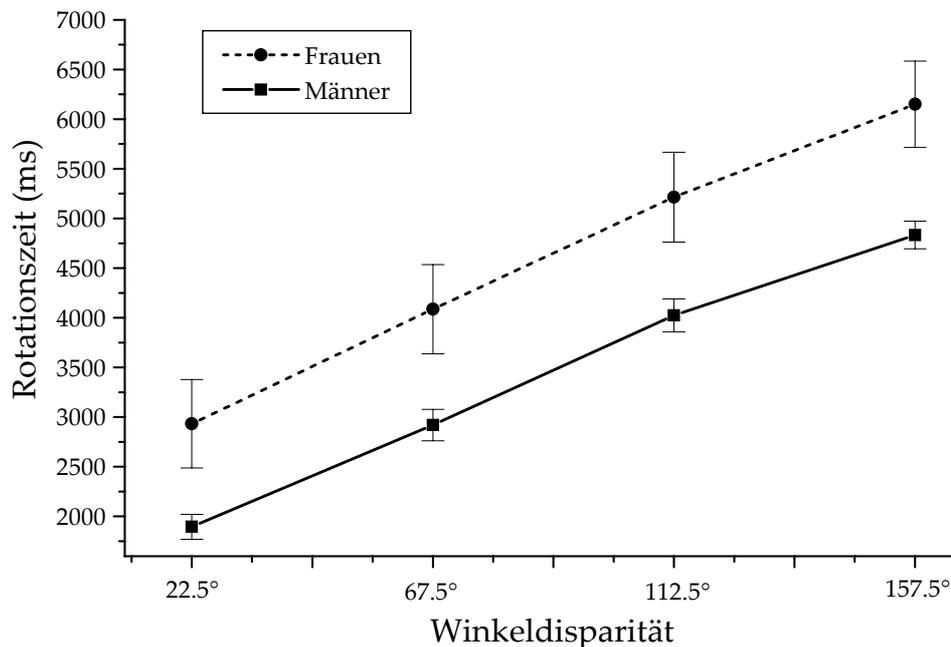


Abbildung 15: Rotationszeit im manuellen Training in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Leistung im manuellen Training (Fehler): Die mittlere Fehlerrate lag bei 1.24% ($SE = 0.27$). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate, $F(3,90) = 4.54$, $p < .05$, $\eta^2 = .13$ (siehe Tabelle 5). Wiederholte Kontraste ergaben Unterschiede nur zwischen dem ersten und zweiten Winkel. Männer und Frauen unterschieden sich nicht, $F(1,30) = 0.72$, $p = .40$, $\eta^2 = .02$.

Tabelle 5

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Männer und Frauen. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Männer	0.16 (0.08)	0.29 (0.11)	0.62 (0.21)	0.39 (0.18)
Frauen	0.33 (0.03)	0.29 (0.11)	0.33 (0.11)	0.36 (0.13)

Leistung im manuellen Training (rotierte Distanz): Die rotierte Distanz unterschied sich in Abhängigkeit von der Winkeldisparität, $F(3,90) = 2007.71$, $p < .001$, $\eta^2 = .99$, wobei wiederholte Kontraste Unterschiede zwischen allen aufeinander folgenden Winkeln zeigten. Die Werte der richtig gedrehten Distanzen waren höher als die der falsch gedrehten, $F(1,30) = 169.56$, $p < .001$, $\eta^2 = .85$, das Geschlecht hatte dagegen keinen Einfluss, $F(1,30) = 0.57$, $p = .45$, $\eta^2 = .02$. Die Winkeldisparität und die Richtung interagierten signifikant miteinander, $F(3,90) = 47.47$, $p < .001$, $\eta^2 = .61$.

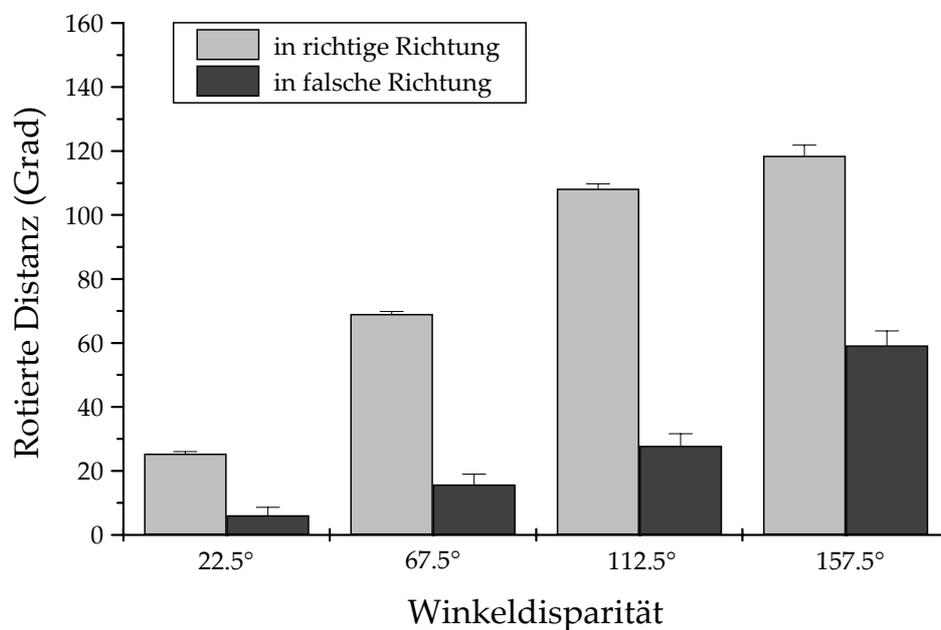


Abbildung 16: Rotierte Distanz abhängig von der Winkeldisparität und der gedrehten Richtung. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

In der Abbildung 16 fällt auf, dass bei der Winkeldisparität von 157.5° die richtig gedrehte Distanz geringer als 157.5° war, was darauf beruht, dass einige Versuchspersonen den „längeren“ Rotationsweg wählten. Die rotierte Distanz um den „längeren“ Weg fließt in die falsch rotierte Distanz ein. Diese besteht demnach aus der Distanz aus Feinjustierungen und aus komplett falsch gedrehten Durchgängen.

Beziehung zwischen der mentalen und der manuellen Rotation: Die RTs der mentalen Rotation (Prätest) korrelierten mit den Rotationszeiten der manuellen Rotation mit $r = .38$ ($p < .05$). Je schneller Versuchspersonen in der mentalen Rotation waren, desto schneller waren sie in der manuellen Rotation. Der Zusammenhang zwischen den RTs des Posttests und den manuellen Rotationszeiten betrug $r = .26$ ($p = .15$). Die Korrelation der rotierten Distanz mit den RTs im Prätest betrug $r = .34$ ($p = .06$) und mit den RTs im Posttest $r = .52$ ($p < .05$). *Post hoc* wurde daraufhin geprüft, ob sich diese beiden Korrelationen unter Berücksichtigung der Interkorrelation signifikant unterschieden (siehe Meng, Rosenthal & Rubin, 1992), was nicht der Fall war ($Z = -1.71$, $p = .08$). Die Steigung im CMR Prätest korrelierte zudem mit der Steigung im Training ($r = .44$, $p < .05$).

3.3 Diskussion

Es zeigte sich – wie schon in Experiment 1 – eine ansteigende Funktion zwischen den Reaktionszeiten und der Winkeldisparität im CMR Prätest, was illustriert, dass die Versuchspersonen die Würfelfiguren mental rotierten. In der manuellen Rotationsaufgabe wurde derselbe Zusammenhang zwischen der Rotationszeit und der Winkeldisparität gefunden. Zudem konnte ein enger Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit in der mentalen und der Rotationszeit in der manuellen Rotation aufgezeigt werden und die Steigungen der Regressionsgeraden in der mentalen Rotation korrelierten mit den Steigungen in der manuellen Rotation. Außerdem zeigte sich ein Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten im CMR Prä- und Posttest und der rotierten Distanz in der manuellen Aufgabe: Versuchspersonen, die in der mentalen Rotationsaufgabe langsamer waren, rotierten um längere Distanzen im manuellen Training.

Im Gegensatz zu Experiment 1 unterschieden sich die Geschlechter nicht in der mentalen Rotationsaufgabe. In der manuellen Rotation waren Männer jedoch schneller als Frauen. Die Analyse der Regressionsgeraden ergab, dass dieser Rotationszeitunterschied nicht auf der manuellen Rotationsgeschwindigkeit beruhte. Frauen scheinen demnach in der manuellen Rotation für andere Prozesse wie der Stimulusenkodierung oder Vergleichsprozesse mehr Zeit zu brauchen. Männer und Frauen unterschieden sich nicht in der rotierten Distanz, was bedeutet, dass die längeren Rotationszeiten der Frauen nicht auf größeren Distanzen beruhten.

Die Experimental- und die Kontrollgruppe unterschieden sich signifikant in ihren Reaktionszeit-Differenzwerten. Versuchspersonen, die das manuelle Rotationstraining durchgeführt hatten, zeigten einen höheren Zeitgewinn als Versuchspersonen, die das Computerquiz gespielt hatten. Ein *Speed-Accuracy Trade-Off* kann ausgeschlossen werden, da sich die beiden Gruppen nicht in ihren Fehler-Differenzwerten unterschieden. Die Differenzwerte der Reaktionszeiten unterschieden sich zwischen Versuchspersonen mit guter und schlechter mentaler Rotationsfähigkeit. Dieser Unterschied zeigte sich jedoch unabhängig von der Art der Intervention. Schlechte mentale Rotierer profitieren demnach in höherem Maße als gute mentale Rotierer von der bloßen Wiederholung der mentalen Rotationsaufgabe. Wie erwartet, wurden keine geschlechtsabhängigen Trainingseffekte gefunden.

Eine Analyse der verwendeten Objekte im Posttest deckte auf, dass der Trainingseffekt auf der schnelleren Bearbeitung von Objekten beruht, die vorher im Training gelernt wurden. Damit konnte die Annahme, dass ein manuelles Training im Gegensatz zu einem mentalen (z.B. Heil et al., 1998) den Rotationsprozess an sich trainiert, nicht bestätigt werden. Der Trainingseffekt scheint bei Erwachsenen auch in einem manuellen Rotationstraining auf Gedächtnisprozessen zu beruhen (siehe Abschnitt 6.4.1.1. für eine ausführliche Diskussion).

Erwachsene Versuchspersonen profitierten vom manuellen Training. Der Trainingseffekt scheint dabei jedoch auf Reaktionszeitverkürzungen bei der Rotation von alten, im Training präsentierten Objekten zu beruhen. Aufgrund der engen Zusammenhänge von motorischen und mentalen Prozessen bei der mentalen Rotation im

Kindesalter (Frick et al., 2005; Funk et al., 2005) wird dennoch angenommen, dass ein manuelles Training für Kinder nicht objektspezifisch ist, sondern den Rotationsprozess an sich trainiert. Entsprechend anderer Studien zur mentalen Rotation bei Kindern (siehe z.B. Marmor, 1975, 1977) wurden das Stimulusmaterial des CMRs und des manuellen Trainings verändert.

4 Experiment 3³

In Experiment 3 wurde der Einfluss des manuellen Trainings auf die mentale Rotationsfähigkeit bei Kindern untersucht. Es wurde angenommen, dass – wie auch bei Erwachsenen – das manuelle Training die mentale Rotationsfähigkeit verbessert. Ähnlich wie in anderen Studien mit Kindern (z.B. Estes, 1998; Marmor, 1975, 1977; Roberts & Bell, 2002) wurden in Experiment 3 bei der mentalen und manuellen Rotationsaufgabe statt der dreidimensionalen Würfelfiguren bunte Tierbilder verwendet. Aus zwei Gründen wurde davon ausgegangen, dass bei Kindern ein potentieller Trainingseffekt nicht auf Stimuli, die im Training gelernt wurden, beschränkt ist: Erstens scheint die Beziehung zwischen mentaler und motorischer Rotation bei Kindern noch enger zu sein als bei Erwachsenen (Frick et al., 2005; Funk et al., 2005). Zweitens kann angenommen werden, dass eine visuell wahrgenommene Rotation, wie es im manuellen Training der Fall ist, besonders für Kinder wichtig ist: Vor allem Kindern mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit könnte die Visualisierung helfen, den Rotationsprozess überhaupt nachvollziehen zu können. Es wurde zudem untersucht, ob Kinder mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit sich stärker verbessern als Kinder mit guter Rotationsfähigkeit und ob sich Mädchen und Jungen in ihrer mentalen und manuellen Rotationsleistung unterscheiden.

4.1 Methode

4.1.1 Stichprobe

Von anfangs 71 teilnehmenden Kindern wurden sieben aus der Datenanalyse ausgeschlossen, da ihre Fehlerrate im computerbasierten mentalen Rotationstest über 40% lag. Die berichteten Ergebnisse basieren somit auf 64 Kindern, wobei die Hälfte davon Mädchen waren. Die Kinder waren 10 und 11 Jahre ($M = 10.67$, $SD = 0.70$) alt.

³ Eine Beschreibung des Experiments 3 findet sich auch in Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2006). *Manual training of mental rotation in children*. Manuscript submitted for publication.

Dieses Alter wurde gewählt, da erstens davon auszugehen ist, dass die Kinder die mentale Rotation ohne Probleme beherrschen und zweitens das Training auch im Hinblick auf die Anwendung mit Spina bifida-Kindern – die im Mittel 11 Jahre alt waren – evaluiert wurde. Die Rekrutierung der Kinder erfolgte durch Anzeigen auf der Homepage der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und in lokalen Zeitungen, in denen Kinder zur Teilnahme an einem computerbasierten Test zum räumlichen Vorstellungsvermögen gesucht wurden. Die Eltern der Kinder wurden über das Ziel der Untersuchung aufgeklärt. Sie unterschrieben eine Einverständniserklärung zur Versuchsteilnahme ihrer Kinder und zur Datenverwertung.

4.1.2 Versuchsaufbau

Fragebogen: Auf einem Fragebogen wurden Alter, Händigkeit, Geschlecht, die besuchte Schule und Klasse, die letzte Zeugnisnote in Mathematik und Deutsch, die Computernutzung (0-1 Stunde/Tag, 1-3 Stunden/Tag, mehr als 3 Stunden/Tag), die Häufigkeit von Computerspielen (nie, ein- bis zweimal/Woche, drei- bis siebenmal/Woche, mehr als siebenmal/Woche) und die Joystickvorerfahrung (keine, geringe, erfahren) erfasst.

Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotationsfähigkeit: Es wurde ein kurzer mentaler Rotationstest für Kinder verwendet, der zuvor in einer großen Studie an 604 Kindern und Jugendlichen im Alter von 7 bis 15 Jahren durchgeführt und evaluiert wurde (Lohaus et al., 1999). Aufgabe der Kinder ist es, zu entscheiden, ob paarweise präsentierte Würfelfiguren identisch oder verschieden sind. Von den insgesamt acht Items sind vier identisch und vier verschieden. Alle Würfelfiguren werden als einfache schwarz-weiße Strichzeichnungen dargeboten, wie in Abbildung 1 dargestellt ist. Während die identischen Figuren sowohl in der Bildebene als auch in der Bildtiefe um nicht näher definierte Winkelgrade rotiert sind, handelt es sich bei den „verschiedenen“ Figuren um gespiegelte Versionen der Standardfigur. Zur Bearbeitung stehen zwei Minuten zur Verfügung.

Der computerbasierte mentale Rotationstest für Kinder (CMR-K): Der CMR-K war im Aufbau und der Durchführung identisch mit dem in Experiment 1 beschriebenen

CMR für Erwachsene. Es wurden jedoch statt der Würfelfiguren bunte Tierbilder verwendet, die ursprünglich aus dem Bilderset von Snodgrass und Vanderwart (1980) stammten und später koloriert wurden (Rossion & Pourtois, 2004). In Abbildung 17 ist beispielhaft ein verwendetes Bild dargestellt. Es wurden nur Tiere gewählt, die klar erkennbar und nicht zu auffällig koloriert waren und vier Beine hatten. Eine Übersicht der verwendeten Tiere gibt die Tabelle 6 und der Anhang B.

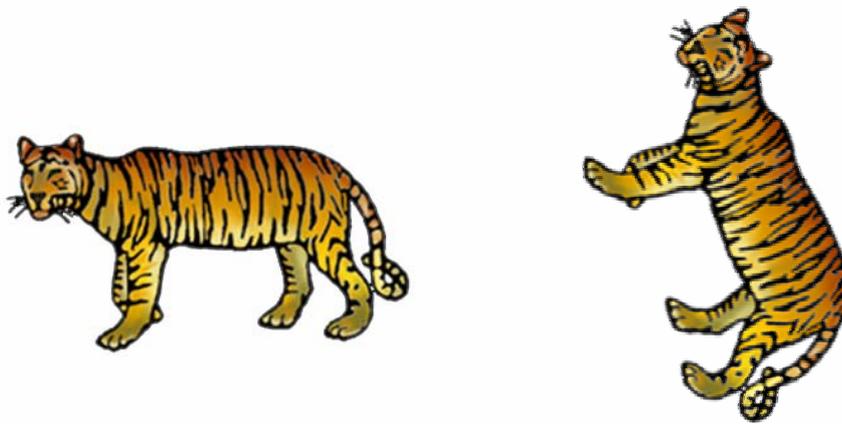


Abbildung 17: Beispielitem eines Durchgangs mit identischen Tierbildern aus dem CMR-K. Die Winkeldisparität beträgt hier 67.5° .

Beim gewählten Abstand der Kinder zum Monitor von 50 cm hatten die Tiere eine Länge von etwa 10° Sehwinkel. Die Tiere wurden vor schwarzem Hintergrund präsentiert. Das aufrecht stehende Standardbild wurde mit einem Vergleichsbild vorgegeben, das in 50% der Durchgänge identisch und in 50% gespiegelt war. Die Hälfte der Standardbilder stand mit dem Kopf nach links, die andere Hälfte nach rechts.

CMR-K Prätest: Der CMR-K wurde als Posttest verwendet; eine parallele Version des CMR-K wurde entwickelt und diente als Prätest. Die Prätest-Version glich dem CMR-K bis auf zwei Punkte: (1) sie bestand aus 6 statt 12 Bildern und damit aus insgesamt 96 Durchgängen und (2) es wurden andere Bilder verwendet (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6

Übersicht über die verwendeten Tierbilder (siehe Rossion & Pourtois, 2004).

CMR-K Prätest	Training	CMR-K Posttest
Elefant	Bär	Bär
Fuchs	Esel	Esel
Krokodil	Hund	Hund
Kuh	Schwein	Schwein
Leopard	Tiger	Tiger
Pferd	Ziege	Ziege
	Affe	Kamel
	Hase	Löwe
	Katze	Nashorn
	Maus	Reh
	Schildkröte	Schaf
	Seelöwe	Waschbär

Das computerbasierte manuelle Rotationstraining für Kinder: Mit Ausnahme der verwendeten Stimuli glich das computerbasierte manuelle Rotationstraining für Kinder dem manuellen Training aus Experiment 2. Das Stimulusmaterial bestand wie das im CMR-K aus 12 farbigen Tierbildern (Rossion & Pourtois, 2004). Wie in Tabelle 6 zu ersehen, waren 6 dieser Bilder identisch mit Figuren aus dem CMR-K Posttest, die restlichen 6 wurden nur im Training verwendet. Diese letztgenannten Bilder waren schwieriger zu bearbeiten, da nicht alle vier Beine zu erkennen waren und sie somit weniger Richtungshinweise boten (siehe Rosser et al., 1984). Das Training bestand demnach – identisch zum Training der Erwachsenen – aus 6 Stimuli, die im CMR-K Posttest wieder präsentiert wurden, was impliziert, dass der CMR-K Posttest aus 6 „alten“ und 6 „neuen“ Bildern bestand. Abbildungen aller verwendeten Tierbilder

wird in Anhang B gegeben. Entsprechend zum Training der Erwachsenen konnte die Vergleichsfigur mittels eines Joysticks in der Bildebene gedreht werden.

Computerquiz: Das Computerquiz „Wer wird Millionär? Junior Edition“ wurde verwendet. Der Aufbau und die Durchführung des Quiz glichen den in Experiment 2 beschriebenen, nur waren die Fragen kindgerecht.

Die verwendeten Geräte waren dieselben wie in Experiment 1 und 2. Zur Programmierung des CMR-Ks und des manuellen Trainings war die Software *3D GameStudio A6* von *Conitec* verwendet worden, die auch zur Präsentation benutzt wurde.

4.1.3 Versuchsdurchführung

Der Versuchsablauf war identisch mit dem Ablauf des Experiments 2. Die Kinder wurden zu zweit getestet, wobei jeweils ein Kind zur EG (16 Jungen und 16 Mädchen) und ein Kind zur KG (16 Jungen und 16 Mädchen) zugeordnet wurden. Um Ablenkung zu vermeiden, waren die Kinder durch Trennwände getrennt und trugen Kopfhörer. Vor der Durchführung des CMR-K Prätests wurde der Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation vorgeben.

4.1.4 Design und statistische Analyse

Fragebogen: Die Daten der Fragebogen wurden über alle Kinder hinweg gemittelt beziehungsweise die Häufigkeiten ermittelt. Bivariate Korrelationen zwischen den Schulnoten und der Leistung in den mentalen Rotationstests und der manuellen Aufgabe wurden erhoben. Des Weiteren wurden univariate Varianzanalysen für die abhängigen Variablen RT und Fehlerrate im Prätest und Rotationszeit und Fehlerrate im manuellen Training berechnet. Gruppen-Faktoren waren die Computernutzung (0-1 Stunde/Tag, 1-3 Stunden/Tag, mehr als 3 Stunden/Tag), die Häufigkeit von Computerspielen (nie, ein- bis zweimal/Woche, drei- bis siebenmal/Woche, mehr als siebenmal/Woche) und die Joystickvorerfahrung (keine, geringe, erfahren).

Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation: Für jedes Kind wurde die Gesamtpunktzahl berechnet, wobei ein Punkt für jede richtige Lösung gegeben wird. Die

höchstmögliche Punktzahl liegt bei 8. Eine univariate Varianzanalyse mit dem Gruppen-Faktor Geschlecht wurde gerechnet.

Die Analysen des CMR-Ks, der Trainingseffekte und der Leistung im manuellen Training entsprachen den in Experiment 2 beschriebenen.

Korrelationen zwischen der mentalen und der manuellen Rotation: Neben dem Zusammenhang zwischen der mentalen und der manuellen Rotation (siehe Experiment 2) wurden Korrelationen der Punktwerte des Papier- und Bleistift-Tests der mentalen Rotation mit den RTs und Fehlern im CMR-K Prätest sowie mit der Steigung der Regressionsgeraden berechnet.

4.2 Ergebnisse

Fragebogen: 61 Kinder waren rechtshändig und 3 linkshändig. 8 Kinder besuchten die vierte Klasse, 26 die fünfte und 30 die sechste. Dabei ging die große Mehrzahl von 51 Kindern auf ein Gymnasium. Der Mittelwert der Schulnoten lag in Mathematik bei 2.20 ($SD = 0.83$) und in Deutsch bei 2.40 ($SD = 1.07$). Die Schulnoten korrelierten weder mit der Leistung im Papier- und Bleistift-Test noch mit der Leistung im CMR-K oder im manuellen Training. 48 Kinder gaben an, höchstens eine Stunde täglich am Computer zu verbringen, 14 Kinder gaben zwischen einer und drei Stunden täglich und 2 Kinder mehr als drei Stunden täglich an. Bei der Häufigkeit von Computerspielen in der Woche machten die Kinder folgende Angaben: 11 Kinder nie, 25 Kinder zwischen ein- und zweimal, 27 Kinder zwischen drei- und siebenmal und ein Kind häufiger als siebenmal. 30 Kinder hatten noch nie mit einem Joystick gespielt, 26 hatten schon wenige Male damit gespielt und 8 Kinder bezeichneten sich als joystickerfahren. Keine der computerbezogenen Variablen hatte einen Einfluss auf die Leistung im Papier- und Bleistift-Test, im CMR-K oder im manuellen Training.

Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation: Die mittlere Punktzahl aller Kinder betrug $M = 6.55$ ($SD = 1.60$). Jungen ($M = 7.13$, $SD = 1.26$) erreichten höhere Punktwerte als Mädchen ($M = 5.93$, $SD = 1.73$), wobei sich diese Punktwerte als signifikant unterschiedlich erwiesen, $F(1,62) = 9.30$, $p < .05$, $\eta^2 = .13$.

Mentale Rotationsfähigkeit (RT): Die Winkeldisparität beeinflusste die RTs im CMR-K signifikant, $F(3,186) = 76.28$, $p < .001$, $\eta^2 = .55$. Wiederholte Kontraste zeigten, dass sich dabei jeder Winkel vom nächst höheren unterschied. Wie in Abbildung 18 illustriert, waren die Reaktionszeiten der Jungen kürzer als die der Mädchen, $F(1,62) = 7.22$, $p < .05$, $\eta^2 = .10$. Die gemittelte Steigung der Regressionsgeraden lag bei 7.25 ms/Grad (137.90°/s). Das Geschlecht beeinflusste die Steigung nicht (Jungen 6.66 ms/Grad, Mädchen 7.85 ms/Grad, $F(1,62) = 0.86$, $p = .36$, $\eta^2 = .01$).

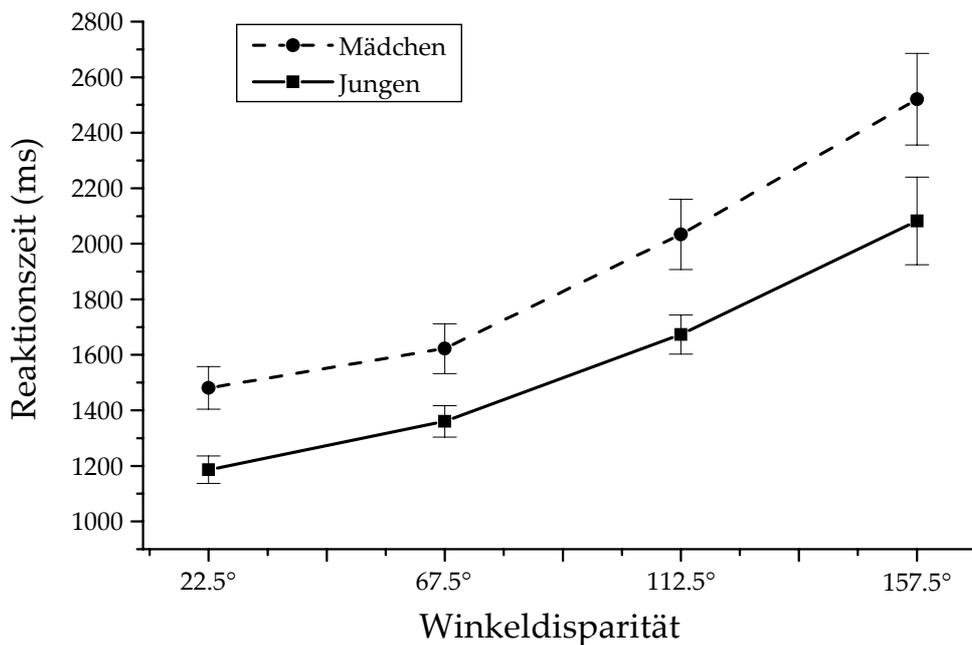


Abbildung 18: Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Mentale Rotationsfähigkeit (Fehler): Die Fehlerrate lag im CMR-K Prätest bei 6.39%. In Tabelle 7 ist die Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität aufgeführt. Es konnte ein signifikanter Effekt der Winkeldisparität auf die Fehlerrate gefunden werden, $F(3,186) = 7.56$, $p < .05$, $\eta^2 = .16$. Wiederholte Kontraste zeigten – mit Ausnahme der ersten beiden Winkeldisparitäten – signifikante Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Winkeln. Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf die Fehlerrate, $F(1,62) = 1.56$, $p = .22$, $\eta^2 = .03$.

Tabelle 7

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Jungen und Mädchen. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Jungen	1.14 (0.27)	0.81 (0.26)	1.53 (0.33)	1.69 (0.39)
Mädchen	1.24 (0.36)	1.63 (0.43)	1.85 (0.48)	2.89 (0.66)

Trainingseffekte (RT): Die RT-Differenzwerte unterschieden sich signifikant zwischen der EG und der KG, $F(1,56) = 7.18, p < .05, \eta^2 = .11$. Die RT-Trainingseffekte waren für Kinder in der EG größer als für Kinder in der KG (siehe Abbildung 19). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die RT-Differenzwerte, $F(3,168) = 9.10, p < .001, \eta^2 = .14$. Wiederholte Kontraste zeigten, dass sich – mit Ausnahme der ersten beiden Winkel – jeder Winkel vom nächst höheren unterschied mit höheren Differenzwerten für größere Winkel. Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf die Differenzwerte, $F(1,56) = 0.04, p = .84, \eta^2 < .01$, ebenso wenig die Interaktion zwischen der Winkeldisparität und der Gruppe, $F(3,168) = 2.30, p = .08, \eta^2 = .05$.

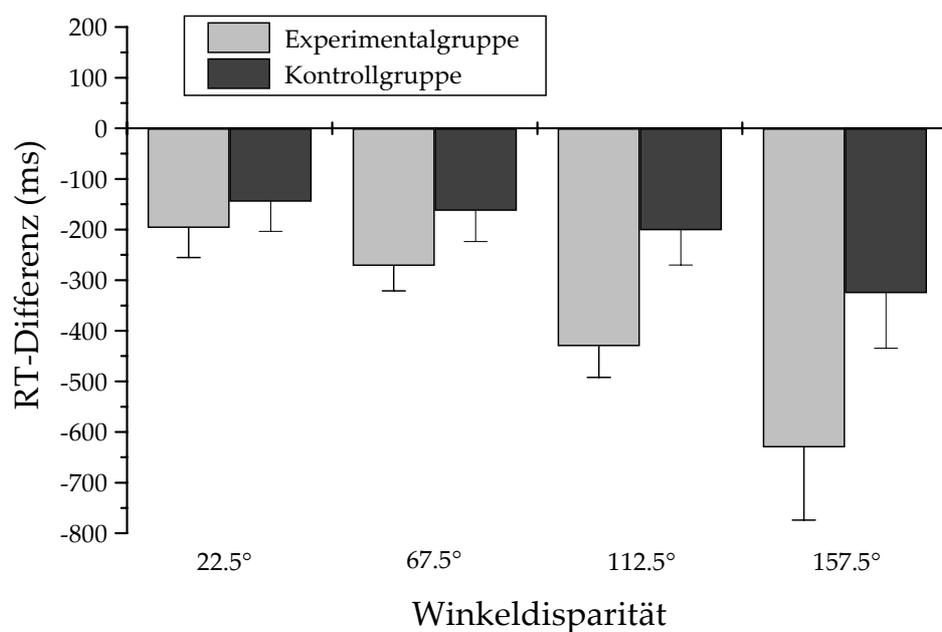


Abbildung 19: RT-Differenzwerte für die Experimental- und die Kontrollgruppe abhängig von der Winkeldisparität. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die RT-Differenzwerte für „alte“ Objekte unterschieden sich nicht von den Differenzwerten für „neue“ Objekte, $F(1,56) = 0.28$, $p = .60$, $\eta^2 < .01$. Es gab weder eine Interaktion zwischen der Art der Objekte und der Gruppe, $F(1,56) = 0.14$, $p = .71$, $\eta^2 < .01$ (siehe Abbildung 20), noch zwischen der Art der Objekte, der Gruppe und der Winkeldisparität, $F(3,168) = 0.87$, $p = .44$, $\eta^2 = .02$.

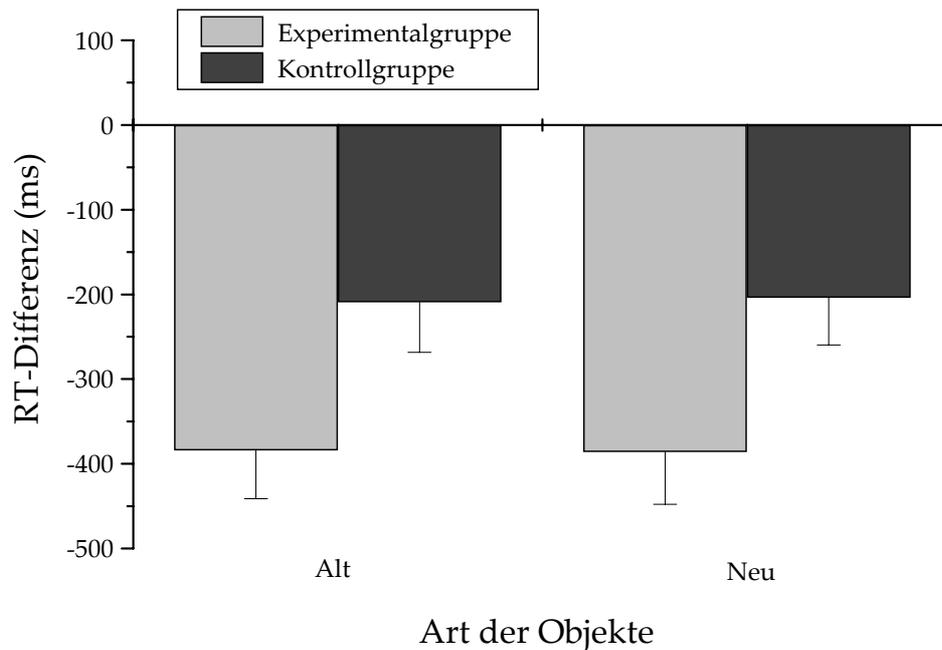


Abbildung 20: RT-Differenzwerte für die Experimental- und die Kontrollgruppe getrennt für „alte“ und „neue“ Objekte. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Um den Einfluss der mentalen Rotationsfähigkeit zu analysieren, wurden auf Basis der RTs im CMR-K Prätest *post hoc* vier Gruppen mit folgenden Mittelwerten zusammengestellt: gute mentale Rotierer aus der EG ($M = 1378.55$ ms, $SE = 63.85$; 11 Jungen und 5 Mädchen), gute mentale Rotierer aus der KG ($M = 1343.16$ ms, $SE = 45.44$; 7 Jungen, 9 Mädchen), schlechte mentale Rotierer aus der EG ($M = 2260.73$ ms, $SE = 117.10$; 5 Jungen, 11 Mädchen) und schlechte mentale Rotierer aus der KG ($M = 1904.36$ ms, $SE = 92.09$; 9 Jungen, 7 Mädchen). Die mentale Rotationsfähigkeit hatte einen signifikanten Einfluss auf die RT-Differenzwerte, $F(1,56) = 22.45$, $p < .001$, $\eta^2 = .29$. Es zeigte sich keine signifikante Interaktion zwischen der mentalen Rotationsfähigkeit und der Gruppe, $F(1,56) = 1.23$, $p = .27$, $\eta^2 = .02$. Die mentale Rotationsfähig-

keit agierte dagegen signifikant mit der Winkeldisparität, $F(3,168) = 3.25$, $p < .05$, $\eta^2 = .06$. Die RT-Differenzwerte für gute und schlechte mentale Rotierer der EG und der KG sind in Abbildung 21 abgetragen.

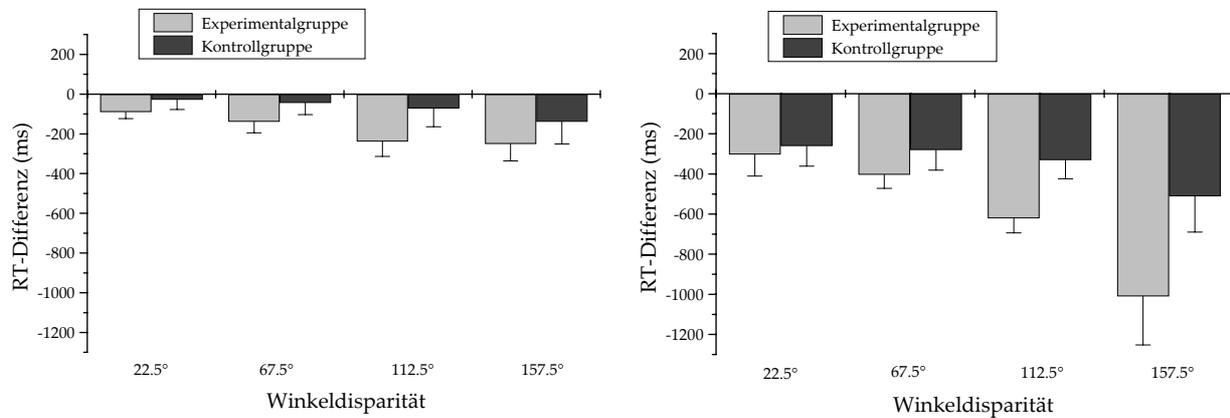


Abbildung 21: RT-Differenzwerte für die Experimental- und die Kontrollgruppe abhängig von der Winkeldisparität. Die linke Abbildung illustriert die Daten für gute Rotierer, die rechte die Daten für schlechte Rotierer. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

In Bezug auf die Steigung der Regressionsgeraden im Posttest hatte die Gruppenzugehörigkeit – unter Berücksichtigung der Steigung im Prätest als Kovariate – keinen Einfluss, $F(1,55) = 1.60$, $p = .21$, $\eta^2 = .03$. Das Geschlecht beeinflusste die Steigung im Posttest signifikant, $F(1,55) = 4.41$, $p < .05$, $\eta^2 = .07$. Die Interaktion zwischen dem Geschlecht und der Gruppe war nicht signifikant, $F(1,55) = 1.92$, $p = .17$, $\eta^2 = .03$ (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8

Steigungen der Regressionsgeraden (in ms/Grad) des CMR-K Posttests in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit und getrennt für „alte“ und „neue“ Objekte, für gute und schlechte mentale Rotierer und für Jungen und Mädchen.

	„alte“ Objekte	„neue“ Objekte	Gute Rotierer	Schlechte Rotierer	Jungen	Mädchen
Experimentalgruppe	4.55	4.91	3.80	5.76	4.30	5.26
Kontrollgruppe	5.57	4.44	4.06	6.33	4.05	6.34

Gute und schlechte mentale Rotierer unterschieden sich nicht in der Steigung, $F(1,55) = 2.25$, $p = .14$, $\eta^2 = .04$, und auch die Interaktion mit der Gruppe erwies sich als nicht signifikant, $F(1,55) = 1.07$, $p = .31$, $\eta^2 = .02$. Die Steigung der Regressionsgeraden im Posttest für „alte“ Objekte unterschied sich nicht in Abhängigkeit von der Gruppe, $F(1,61) = 1.05$, $p = .31$, $\eta^2 = .02$. Dasselbe galt für „neue“ Objekte, $F(1,61) = 0.39$, $p = .53$, $\eta^2 < .01$ (siehe Tabelle 8).

Trainingseffekte (Fehler): Tabelle 9 zeigt die Differenzwerte der Fehlerraten getrennt für die EG und die KG. Die Gruppenzugehörigkeit hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Fehler-Differenzwerte, $F(1,56) = 2.56$, $p = .12$, $\eta^2 = .04$. Genauso wenig zeigte sich ein Einfluss der Winkeldisparität, $F(3,168) = 0.75$, $p = .45$, $\eta^2 = .01$, der mentalen Rotationsfähigkeit, $F(1,56) = 0.11$, $p = .74$, $\eta^2 < .01$, oder des Geschlechts, $F(1,56) = 2.98$, $p = .09$, $\eta^2 = .05$. „Alte“ und „neue“ Objekte hatten keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Fehler-Differenzwerte, $F(1,56) = 1.05$, $p = .31$, $\eta^2 = .02$. Es gab keine Interaktionen zwischen den Faktoren.

Tabelle 9

Fehler-Differenzwerte in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und getrennt für die Experimental- und die Kontrollgruppe. Negative Werte bedeuten niedrigere Fehlerraten im CMR-K Posttest. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Experimentalgruppe	-0.60 (0.32)	-0.63 (0.41)	-0.86 (0.37)	-1.33 (0.51)
Kontrollgruppe	-0.46 (0.17)	-0.16 (0.21)	-0.33 (0.32)	-0.11 (0.63)

Leistung im manuellen Training (Rotationszeit): Die Winkeldisparität beeinflusste die Rotationszeit signifikant, $F(3,90) = 730.48$, $p < .001$, $\eta^2 = .96$. Wiederholte Kontraste zeigten signifikante Unterschiede zwischen allen aufeinander folgenden Winkeln. Jungen und Mädchen unterschieden sich dabei nicht, $F(1,30) = 0.69$, $p = .41$, $\eta^2 = .02$. In Abbildung 22 sind die Rotationszeiten in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht illustriert. Die gemittelte Steigung betrug 20.20 ms/Grad

(49.50°/s). Jungen und Mädchen unterschieden sich nicht in der Steigung (Jungen 20.21 ms/Grad, Mädchen 20.17 ms/Grad, $F(1,30) = 0.002$, $p = .97$, $\eta^2 < .01$).

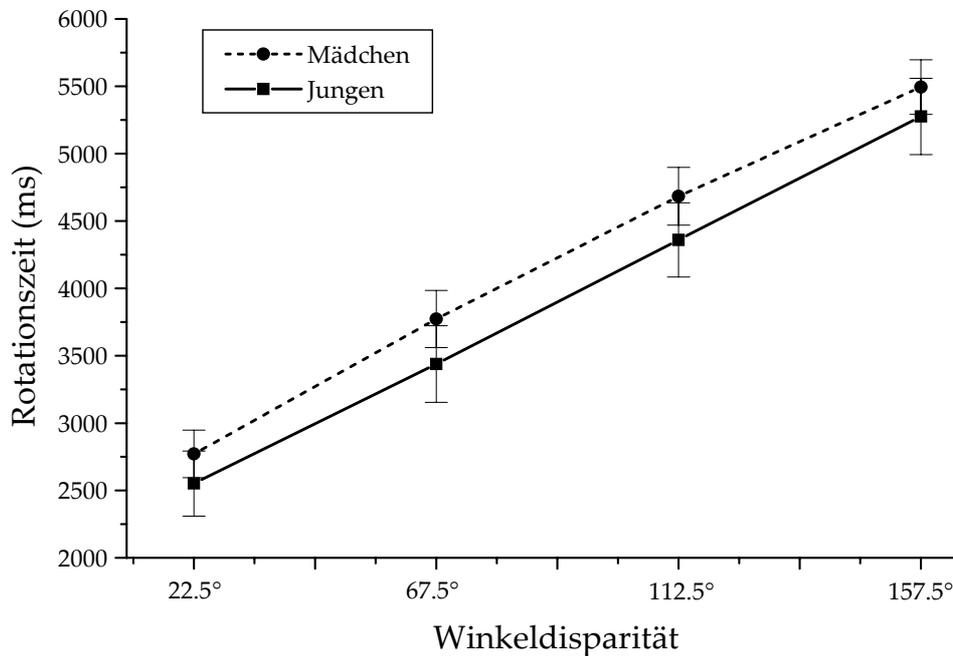


Abbildung 22: Rotationszeit im manuellen Training in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und dem Geschlecht. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Leistung im manuellen Training (Fehler): Die mittlere Fehlerrate lag bei 2.90% ($SE = 0.68$). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Effekt auf die Fehlerrate, $F(3,90) = 4.38$, $p < .05$, $\eta^2 = .13$. Wiederholte Kontraste zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Winkeldisparität. Wie in Tabelle 10 illustriert, hatte das Geschlecht keinen Einfluss auf die Fehlerrate, $F(1,30) = 0.16$, $p = .69$, $\eta^2 < .01$.

Tabelle 10

Fehlerrate im manuellen Training abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Jungen und Mädchen. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Jungen	0.49 (0.21)	0.75 (0.23)	0.98 (0.33)	0.98 (0.24)
Mädchen	0.16 (0.10)	0.88 (0.41)	0.68 (0.35)	0.91 (0.32)

Leistung im manuellen Training (rotierte Distanz): Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die rotierte Distanz, $F(3,90) = 3722.32$, $p < .001$, $\eta^2 = .99$, wobei wiederholte Kontraste Unterschiede zwischen allen aufeinander folgenden Winkeln zeigten (siehe Abbildung 23). Die gedrehte Richtung beeinflusste die rotierte Distanz, $F(1,30) = 1106.08$, $p < .001$, $\eta^2 = .97$, und interagierte mit der Winkeldisparität, $F(3,90) = 138.01$, $p < .001$, $\eta^2 = .82$. Jungen und Mädchen unterschieden sich nicht, $F(1,30) = 0.50$, $p = .48$, $\eta^2 = .02$.

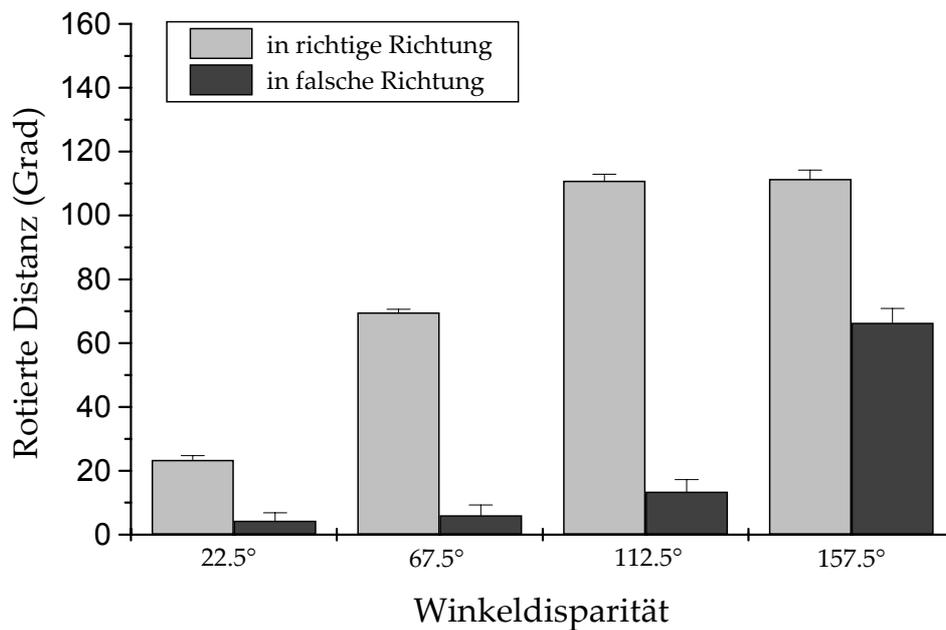


Abbildung 23: Rotierte Distanz abhängig von der Winkeldisparität und der gedrehten Richtung. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Korrelationen zwischen der mentalen und der manuellen Rotation: Die Rotationszeiten der manuellen Rotation korrelierten weder mit den RTs im CMR-K Prätest ($r = .23$, $p = .20$) noch mit den RTs im Posttest ($r = .04$, $p = .84$). Die Korrelation der rotierten Distanz mit den RTs im Prätest betrug $r = .34$ ($p = .06$) und mit den RTs im Posttest $r = .17$ ($p = .35$), wobei sich diese beiden Korrelationen in einer *post hoc*-Analyse unter Berücksichtigung der Interkorrelation (nach Meng et al., 1992) als nicht unterschiedlich erwiesen ($Z = 1.37$, $p = .17$). Die Fehlerrate im manuellen Training korrelierte mit der Fehlerrate im CMR-K Prätest mit $r = .35$ ($p = .05$) und mit der Fehlerrate im Posttest mit $r = .12$ ($p = .52$). Diese beiden Korrelationen erwiesen sich als nicht unterschiedlich

($Z = 1.38, p = .17$). Die Steigungen im CMR-K Prätest und im manuellen Training korrelierten nicht signifikant miteinander ($r = .14, p = .44$).

Korrelation zwischen dem Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation und dem CMR-K: Der Punktwert im Papier- und Bleistift-Test korrelierte weder signifikant mit den RTs ($r = -.23; p = .06$) noch mit der Fehlerrate ($r = -.18, p = .19$) im CMR-K Prätest. Zudem korrelierte die Leistung im Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation nicht mit der Steigung der Regressionsgeraden ($r = -.06; p = .65$) im CMR-K Prätest.

4.3 Diskussion

Die Ergebnisse des CMR-K zeigten eine ansteigende Funktion zwischen Reaktionszeiten und Winkeldisparität. Kinder im Alter von zehn und elf Jahren rotierten demnach mental, um zu entscheiden, ob die beiden präsentierten Bilder identisch oder verschieden sind (siehe Shepard & Metzler, 1971). Um die Aufgabe zu erleichtern, wurden, wie in vielen anderen Studien zuvor, zweidimensionale Bilder verwendet (z.B. Estes, 1998; Marmor, 1975, 1977; Roberts & Bell, 2002). Die mentale Rotationsgeschwindigkeit betrug $137.9^\circ/s$, was im Bereich anderer Studien mit Kindern in ähnlichem Alter liegt. So konnte Marmor (1975) eine mentale Rotationsgeschwindigkeit von $167^\circ/s$ für achtjährige Kinder finden, wobei in dieser Studie nur ein einziger Stimulus verwendet wurde, was die Rotationsgeschwindigkeit mit steigender Anzahl an Durchgängen erhöht (siehe Kail & Park, 1990). In der Studie von Kail et al. (1980) lagen die mentalen Rotationsgeschwindigkeiten von Neunjährigen bei $141^\circ/s$ für alphanumerische und bei $102^\circ/s$ für abstrakte Symbole. Zudem lag die Fehlerrate im CMR-K mit 6.39% auf einem relativ niedrigen Niveau, was zeigt, dass die Aufgabe für die Kinder einfach war. Dabei stieg die Fehlerrate mit steigender Winkeldisparität, was den Befunden in anderen Studien mit Erwachsenen und Kindern entspricht (Cooper, 1975; Estes, 1998; Marmor, 1975, 1977; Kail et al., 1980). Der Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation korrelierte nicht mit dem computerbasierten mentalen Rotationstest.

In der manuellen Rotationsaufgabe wurden ähnliche Ergebnisse wie in der mentalen Rotationsaufgabe in Bezug auf die Rotationszeit und die Fehlerrate gefunden. Die Zunahme der Winkeldisparität führte zu steigenden Rotationszeiten, was unter anderem physikalisch mit dem Anstieg der zurückzulegenden Distanzen begründet werden kann. Auch die Fehlerrate stieg mit zunehmender Winkeldisparität an, wobei die Gesamtfehlerrate mit 2.9% sehr gering war.

Die Art der Rotation beeinflusste die Leistung von Jungen und Mädchen unterschiedlich: Während Jungen in der mentalen Rotation (sowohl im Papier- und Bleistift-Test als auch im CMR-K) schneller als Mädchen waren, war dies in der manuellen Rotation nicht der Fall. Eine genauere Analyse der Reaktionszeiten mittels Berechnung der Regressionsgeraden ergab, dass sich Jungen und Mädchen in der Steigung beziehungsweise in der mentalen Rotationsgeschwindigkeit nicht unterscheiden. Die längeren Reaktionszeiten der Mädchen scheinen demnach auf Prozessen wie der Stimuluseinkodierung oder dem Vergleich der Stimuli und nicht auf dem mentalen Rotationsprozess an sich zu beruhen.

Das manuelle Rotationstraining verbesserte die mentale Rotationsleistung. Im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigte die Trainingsgruppe einen größeren Trainingseffekt. Das Training hatte keinen Einfluss auf die Differenzwerte der Fehler (siehe auch Kail & Park, 1990). Deskriptiv zeigte die Experimentalgruppe größere Fehler-Differenzwerte, womit ein *Speed-Accuracy Trade-Off* ausgeschlossen werden kann.

Die Annahme in Bezug auf „alte“ und „neue“ Objekte konnte bestätigt werden: Weder für Reaktionszeiten noch für Fehler unterschieden sich die Differenzwerte zwischen „alten“, im Training gelernten, und „neuen“ Objekten. Der Trainingseffekt basiert somit nicht auf gedächtnisbasierten Prozessen. Vielmehr wurde der mentale Rotationsprozess an sich trainiert, was die Wirksamkeit des Trainings belegt.

Die differentielle Analyse des Trainingseffektes für Kinder mit guter und schlechter mentaler Rotationsfähigkeit zeigte, dass schlechte mentale Rotierer sich durch das Rotationstraining nicht in einem höheren Maße verbesserten als gute. Deskriptiv lässt sich jedoch feststellen, dass Kinder mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit

vor allem im Falle großer Winkeldisparitäten sehr stark vom manuellen Training profitieren konnten: Bei der größten Winkeldisparität waren schlechte mentale Rotierer nach dem Training etwa 1000 ms schneller als im Prätest, nach dem Computerquiz dagegen nur etwa 500 ms. Da das hier entwickelte Training außerdem eine Möglichkeit darstellt, den Prozess der mentalen Rotation an sich zu trainieren, kann vermutet werden, dass Kinder mit schwerwiegenden Beeinträchtigungen der visuell-räumlichen Fähigkeiten in einem höheren Maße von einem manuellen Training profitieren könnten als kognitiv unbeeinträchtigte Kinder. Um diese Annahmen zu prüfen wurde in Experiment 4 das Training mit einer Gruppe von Kindern mit Spina bifida und einer gesunden Kontrollgruppe angewandt.

5 Experiment 4⁴

In Experiment 4 wurde die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida mittels des CMR-Ks erfasst und das manuelle Rotationstraining angewandt. Kinder mit Spina bifida sollten aufgrund ihrer schweren Beeinträchtigungen im Bereich der räumlich-kognitiven Fähigkeiten in höherem Maße von einem manuellen Rotations-training profitieren als gesunde Kinder. Noch nie zuvor war die mentale Rotationsleistung von Spina bifida-Kindern umfassend untersucht worden; es wurde angenommen, dass Kinder mit Spina bifida eine beeinträchtigte Leistung zeigen. Den Ergebnissen aus Experiment 3 zufolge schien der CMR-K leicht genug zu sein, um den Test auch bei Kindern mit potentiell sehr schlechter mentaler Rotationsfähigkeit durchführen zu können. Aufgrund der viel versprechenden Ergebnisse der Experimente 2 und 3 und aufgrund der Seltenheit der Erkrankung und den damit verbundenen Schwierigkeiten der Rekrutierung, wurde auf eine Nicht-Trainingsgruppe verzichtet. Zu beachten ist, dass demnach im Folgenden „Kontrollgruppe“ nicht mehr eine Nicht-Trainingsgruppe beschreibt, sondern eine Vergleichsgruppe gesunder Kinder, die das manuelle Training durchführte. Vor dem eigentlichen Experiment wurde in umfassenden Vorarbeiten die allgemeine Intelligenz und sowohl die klassischen räumlichen Fähigkeiten als auch die räumlichen Fähigkeiten in einem Umgebungsraum untersucht.

5.1 Vorarbeiten

5.1.1 Rekrutierung der Kinder und Stichprobe

Die Kinder mit Spina bifida wurden durch eine Anzeige in der Zeitschrift der *Arbeitsgemeinschaft Spina bifida und Hydrocephalus* (ASbH) und durch eine Kooperation

⁴ Eine Beschreibung dieses Experiments findet sich auch in Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2006). *Mental rotation ability of children with spina bifida: What influence does manual training have?* Manuscript submitted for publication.

mit der Neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Düsseldorf rekrutiert. Es konnten 20 Kinder im Alter zwischen 8 und 14 Jahren ($M = 11.31$, $SD = 1.68$; 7 Jungen, 13 Mädchen) aus Nordrhein-Westfalen gefunden werden, die an der Studie teilnahmen. Bis auf ein Kind litten alle erkrankten Kinder zusätzlich an einem Hydrozephalus. Keines der Kinder litt an einer unkontrollierten Epilepsie, einer Wahrnehmungsstörung oder zeigte Verhaltensauffälligkeiten. Die Läsionen befanden sich bei 5 Kindern im Sakral-, bei 11 Kindern im Lumbal- und bei 4 im Thorakalbereich. Nach dem *Matched Pair*-Verfahren wurde eine zweite Gruppe mit gesunden Kindern zusammengestellt: Jedem Spina bifida-Kind wurde ein gesundes Kind passend nach Geschlecht, Alter und sprachbezogenem IQ zugeordnet. Diese Kinder wurden in zwei Grundschulen (Bensberg und Moers), in einem Gymnasium (Bensberg) und in einer Gesamtschule (Düsseldorf) rekrutiert. Die Kinder der Kontrollgruppe waren im Mittel 11.84 Jahre ($SD = 1.77$) alt.

5.1.2 Elternfragebogen für Eltern mit Spina bifida-Kindern

Es wurde ein Elternfragebogen zur physischen und psychischen Entwicklung der Kinder mit Spina bifida zusammengestellt. Um eventuelle Bezüge der räumlichen Fähigkeiten zur frühkindlichen Raumerfahrung zu untersuchen, sollte der Zeitpunkt des ersten Krabbelns und Laufens in Monaten angegeben werden. Falls Kinder nie das Laufen gelernt hatten, sollte angegeben werden mit welchen Hilfsmitteln (Rollstuhl, orthopädische Schienen) es ihnen ab welchem Monat möglich war, sich fortzubewegen. Des Weiteren wurde die Elterneinschätzung der Schulleistung in Mathematik, der Konzentrationsfähigkeit, des Bewegungsdrangs in der frühen Kindheit, des feinmotorischen Geschicks und der Fähigkeit, sich in der Umwelt zu orientieren erfasst (jeweils auf einer fünfstufigen Skala: sehr hoch, hoch, durchschnittlich, niedrig und sehr niedrig).

Die Kinder lernten im Durchschnitt mit 12.97 ($SE = 0.20$) Monaten krabbeln und mit 29.16 ($SE = 3.60$) Monaten laufen, was einer deutlichen Entwicklungsverzögerung entspricht. Die Schulleistung in Mathematik wurde von den Eltern im Mittel mit 3.50 ($SE = 0.22$), die Konzentrationsfähigkeit mit 3.40 ($SE = 0.16$), der Bewegungsdrang mit

3.40 ($SE = 0.20$), das feinmotorische Geschick mit 3.33 ($SE = 0.14$) und die Orientierungsfähigkeit mit 3.44 ($SE = 0.19$) angegeben.

5.1.3 Intelligenz- und Entwicklungstestung

Mit allen Kindern wurde der HAWIK-III (Tewes, Rossmann & Schallberger, 2001; Wechsler, 1991) durchgeführt. Der konzeptuelle Vorteil dieses Testverfahren liegt in der Trennung von sprachbezogenem und Handlungs-IQ. Da in den Handlungsteil räumliche Fähigkeiten einfließen, liegt die Leistung der Kinder mit Spina bifida in diesem Teil meist unter der Leistung im Verbalteil (siehe Abschnitt 1.1.3.2). Wie erwartet und in Tabelle 11 illustriert, schnitten die Spina bifida-Kinder im Handlungs-IQ deutlich schlechter ab als im Verbal-IQ, $t(19) = 9.71$, $p < .001$, was vor allem auf der sehr schlechten Leistung in Untertests mit stark räumlich-kognitiven Anforderungen basierte (Standardwerte im Mosaiktest $M = 3.90$, $SD = 3.00$ und Figurenlegen $M = 4.40$, $SD = 2.60$).

Tabelle 11

Ergebnisse des HAWIK III der Spina bifida-Kinder und der Kontrollgruppe (Standardabweichungen in Klammern).

	Gesamt-IQ	Verbal-IQ	Handlungs-IQ
Spina bifida	82.90 (10.57)	96.50 (12.88)	71.35 (12.04)
Kontrollgruppe	99.85 (10.04)	101.45 (11.19)	98.30 (12.78)

Während sich der Verbal-IQ der beiden Gruppen aufgrund der Zuordnung nicht unterschied, $F(1,38) = 1.68$, $p = .20$, $\eta^2 = .04$, unterschieden sich der Handlungs-IQ, $F(1,38) = 47.12$, $p < .001$, $\eta^2 = .55$, und der Gesamt-IQ, $F(1,38) = 27.05$, $p < .001$, $\eta^2 = .42$. Für die Kinder mit Spina bifida korrelierte das Alter, in dem sie (mit oder ohne Hilfe) laufen lernten, mit dem Handlungs-IQ mit $r = -.62$ ($p < .05$) und mit dem Verbal-IQ $r = -.44$ ($p = .09$). Diese beiden Korrelationen unterschieden sich unter der Berücksichtigung der Interkorrelation (siehe Meng et al., 1992) nicht ($Z = 0.88$, $p = .38$). Es fanden

sich die höchsten Korrelationen mit dem Lauflernalter in den Unteraufgaben Mosaiktest ($r = -.60$, $p < .05$) und Symbolsuche ($r = -.66$, $p < .05$). Frühe Bewegung scheint demnach im Zusammenhang zu stehen mit einer höheren Intelligenz und dabei vor allem mit Aufgaben des räumlichen Vorstellungsvermögens und der visuellen Suche.

5.1.4 Untersuchung der räumlichen Fähigkeiten von Spina bifida-Kindern⁵

Es wurde eine Testbatterie zusammengestellt, die die drei Faktoren der klassischen räumlichen Fähigkeiten nach Linn und Petersen (1985) erfasste: Die räumliche Veranschaulichung wurde mittels einer Wasserspiegelaufgabe (aus Lohaus et al., 1999) erfasst, die mentale Rotation mittels des in Experiment 3 verwendeten Papier- und Bleistift-Tests und die räumliche Orientierung mittels des *Children Embedded Figures Test* (CEFT, Witkin et al., 1971). Jeweils ein Item der durchgeführten Tests ist in Abbildung 1 dargestellt. Um zu verhindern, dass eventuelle Unterschiede zwischen der Spina bifida- und der Kontrollgruppe auf der Arbeitsgeschwindigkeit beruhen könnten, wurden alle Aufgaben ohne Zeitbegrenzung vorgegeben. Zudem wurde eine Überprüfung des räumlichen Kurzzeitgedächtnisses durch den Untertest *Räumliches Gedächtnis* der *Kaufman-Assessment Battery for Children* (K-ABC, Kaufman & Kaufman, 1983) durchgeführt und die Rohwerte berechnet. In allen drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen (siehe Tabelle 12): Sowohl in der Wasserspiegelaufgabe, $F(1,38) = 15.26$, $p < .001$, $\eta^2 = .29$, als auch in der mentalen Rotation, $F(1,38) = 7.12$, $p < .05$, $\eta^2 = .16$, und im CEFT, $F(1,38) = 56.52$, $p < .001$, $\eta^2 = .60$, schnitten die Kinder mit Spina bifida deutlich schlechter als die gesunden Kinder ab. Sie zeigten zudem eine schlechtere Leistung im räumlichen Kurzzeitgedächtnistest, $F(1,38) = 6.77$, $p < .05$, $\eta^2 = .15$.

⁵ Für eine ausführliche Beschreibung der räumlich-kognitiven Testung siehe Wiedenbauer & Jansen-Osmann (2006). Räumlich-kognitive Fähigkeiten von Kindern mit Spina bifida. *Manuskript unter Begutachtung*.

Tabelle 12

Mittelwerte der räumlichen Tests von Kindern mit Spina bifida und der Kontrollgruppe (Standardabweichungen in Klammern).

	Wasserspiegel- Aufgabe	Mentale Rotation	CEFT	Räumliches Gedächtnis
Spina bifida	1.24 (1.97)	4.60 (1.39)	12.40 (4.95)	14.40 (3.50)
Kontrollgruppe	4.23 (2.80)	5.75 (1.33)	21.65 (2.41)	16.90 (2.49)

Das Alter, in dem die Kinder mit Spina bifida (mit oder ohne Hilfsmittel) laufen lernten korrelierte signifikant mit der Leistung in der Wasserspiegelaufgabe ($r = -.53, p < .05$), mit der Leistung im CEFT ($r = -.71, p < .05$) und mit dem räumlichen Kurzzeitgedächtnis ($r = -.81, p < .05$). Die Korrelation zwischen dem mentalen Rotationstest und dem Lauflernalter betrug $r = -.21$ ($p = .49$); diese Korrelation unterschied sich nicht signifikant von der Korrelation des Lauflernalters mit der Wasserspielaufgabe ($Z = 0.82, p = .42$), dem CEFT ($Z = 1.19, p = .23$) oder dem räumlichen Gedächtnis ($Z = 1.66, p = .10$). Je früher die Kinder sich in ihrer frühen Kindheit bewegten, desto höher war demnach ihre Leistung in den räumlichen Tests.

Um der Forderung nachzukommen, bei der Untersuchung der räumlichen Fähigkeiten auch das räumliche Verhalten und das räumliche Wissen in einem Umgebungsraum mit einzubeziehen (Hegarty & Waller, 2005; Quaiser-Pohl et al., 2004), wurde zudem eine Studie in einer virtuellen Realität durchgeführt.

5.1.5 Untersuchung des räumlichen Verhaltens und Wissens von Spina bifida-Kindern⁶

Zusätzlich zu den klassischen räumlichen Fähigkeiten wurden auch das Routenlernen und das Landmarkenwissen in einem Umgebungsraum untersucht. Dafür wur-

⁶ Für eine ausführliche Beschreibung dieses Experiments siehe Wiedenbauer & Jansen-Osmann (in press). Spatial knowledge of children with spina bifida in a virtual large-scale space. *Brain and Cognition*.

de eine Desktop virtuelle Umgebung verwendet, die schon erfolgreich bei 7-8 und 11-12 Jahre alten Kindern und Erwachsenen angewandt wurde (aus Jansen-Osmann & Wiedenbauer, 2004b). Die virtuelle Umgebung simulierte ein Labyrinth, wie es in Abbildung 24 als Einblick dargestellt ist.



Abbildung 24: Einblick in das verwendete virtuelle Labyrinth.

Aufgabe der Kinder war es, in dem virtuellen Labyrinth den korrekten Weg zu einem Ziel zu finden. Das Labyrinth war so aufgebaut, dass es nur einen einzigen korrekten Weg zum Zielpunkt gab; alle davon abzweigenden Wege waren Sackgassen. Im Labyrinth verteilt standen Landmarken (virtuelle Stofftiere, s. Abbildung 24). Als Lernkriterium musste das Ziel viermal hintereinander ohne Fehler (definiert als Schauen oder Laufen in einen nicht-zielführenden Weg) gefunden werden. Es wurde dabei die Wegfindeleistung anhand der benötigten Lerndurchgänge bis zum Erreichen dieses Lernkriteriums aufgezeichnet. Nach Erreichen des Lernkriteriums wurden in einem Testdurchgang die Landmarken ausgeblendet und die Versuchspersonen sollten ohne Landmarkeninformation zum Ziel gelangen, wobei die Fehlerzahl erfasst wurde. In einem letzten Durchgang sollten in Abwesenheit der Landmarken

die Namen und die Positionen der virtuellen Stofftiere erinnert werden. Tabelle 13 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 13

Mittelwerte der Untersuchung des räumlichen Verhaltens und Wissens von Spina bifida-Kindern und der gesunden Kontrollgruppe (Standardfehler des Mittelwerts in Klammern).

	Lerndurchgänge	Fehler	Erinnerte Landmarken
Spina bifida	6.20 (2.70)	2.45 (2.31)	5.3 (2.84)
Kontrollgruppe	2.95 (0.89)	0.55 (0.76)	7.7 (2.25)

In diesem Experiment wurden zum ersten Mal nicht nur die visuell-räumlichen Leistungen von Kindern mit Spina bifida untersucht, sondern auch die kognitiven Aspekte des Erwerbs von räumlichem Wissen in einem Umgebungsraum. Es konnte aufgezeigt werden, dass Kinder mit Spina bifida bei der Orientierung in einem Umgebungsraum signifikant schlechter abschneiden als ihre gesunden Altersgenossen: Sie benötigten fast doppelt so viele Lerndurchgänge, um einen zuvor unbekanntem Weg zu lernen, $F(1,38) = 26.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .41$, machten mehr Fehler im Testdurchgang, $F(1,38) = 12.04$, $p < .001$, $\eta^2 = .24$, und erinnerten weniger Landmarken, $F(1,38) = 8.74$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$. Kinder mit Spina bifida scheinen sich eher an den vorhandenen Landmarken zu orientieren, während gesunde Kinder sich an der räumlichen Konfiguration des Raumes orientieren. Zusätzlich zu ihren Defiziten in den klassischen räumlichen Fähigkeiten scheinen Kinder mit Spina bifida somit auch im Erwerb und Abruf räumlicher *Large-Scale* Informationen beeinträchtigt zu sein.

Hochsignifikant erwies sich die Korrelation zwischen dem Alter, in dem die Kinder mit Spina bifida (mit oder ohne Hilfsmittel) laufen lernten, und der Anzahl an benötigten Lerndurchgängen ($r = .79$, $p < .001$). Die frühe eigenständige Bewegung könnte demnach grundlegend für die Ausbildung des räumlichen Orientierungsverhaltens sein (siehe auch Neidhart & Schmitz, 2001; Simms, 1987; Stanton et al., 2002; Yan et al., 1998).

5.2 Methode

5.2.1 Stichprobe

Ein Spina bifida-Kind fiel wegen eines lang andauernden Krankenhausaufenthalts aus. Von den verbliebenen 19 teilnehmenden Kindern mit Spina bifida mussten drei Kinder aus der Datenanalyse ausgeschlossen werden, da ihre Fehlerrate im computerbasierten mentalen Rotationstest über 40% lag. Somit basieren die folgenden Ergebnisse auf 5 Jungen und 11 Mädchen mit Spina bifida und den zugeordneten gesunden Kindern.

5.2.2 Versuchsaufbau

Zur Versuchsdurchführung wurde ein *Centrino* Laptop mit einem 15“-Bildschirm verwendet. Der Abstand zwischen Bildschirm und Versuchsperson betrug etwa 40 cm. Als Eingabegeräte dienten der in den vorherigen Experimenten beschriebene Joystick und eine Computermaus.

Der computerbasierte mentale Rotationstest für Kinder (CMR-K): Der CMR-K Prä- und Posttest aus Experiment 3 wurden verwendet.

Das computerbasierte manuelle Rotationstraining für Kinder: Es wurde das computerbasierte manuelle Rotationstraining aus Experiment 3 angewendet.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Da es den Eltern der Spina bifida-Kinder nicht möglich war, mit ihren Kindern zur Universität zu kommen, wurden alle Kinder – auch die Kinder der Kontrollgruppe – zu Hause getestet. Dabei wurde ein ruhiger Ort, meistens der Schreibtisch im Zimmer der Kinder, gewählt. Eine ungestörte Versuchsdurchführung war in allen Fällen möglich.

Das Experiment startete mit dem CMR-K Prätest. Sowohl die Kinder mit Spina bifida als auch die gesunden Kinder führten danach das manuelle Rotationstraining durch, worauf der CMR-K Posttest folgte.

5.2.4 Design und statistische Analyse

Das Design und die statistische Analyse des CMR-Ks, der Trainingseffekte, der Leistung im manuellen Training und der Korrelationen zwischen der mentalen und manuellen Rotation entsprachen weitgehend dem Design und der Analyse in den Experimenten 2 und 3. Es wurde jedoch eine Analyse von Gruppenunterschieden der Trainingseffekte, im CMR-K und im manuellen Training durchgeführt: Hier wurde bei der Berechnung der Varianzanalysen die Gruppe (Spina bifida vs. Kontrollgruppe) als (quasi-experimenteller) Gruppen-Faktor definiert. Auf die Analyse von Geschlechtsunterschieden wurde verzichtet. Die relativ kleinen Stichproben und die ungleiche Geschlechterverteilung in beiden Gruppen hätte eine Interpretation von potentiellen Geschlechtsunterschieden so gut wie unmöglich gemacht. Außerdem wurden keine differentiellen Effekte des Trainings für Kinder mit guter und schlechter mentaler Rotationsfähigkeit berechnet. Die Korrelationen zwischen der mentalen und der manuellen Rotation wurden zusätzlich getrennt für beide Gruppen berechnet. Um mögliche Zusammenhänge zu den räumlich-kognitiven Fähigkeiten aufzudecken, wurden zudem die Korrelationen dieser Variablen mit den Zeiten sowie den Fehlerraten im CMR-K und im Training berechnet. Bei der Berechnung der Korrelationen mit den anderen räumlich-kognitiven Tests wurde der Handlungs-IQ als partielle Einflussvariable herausgerechnet. Außerdem wurden für die Kinder mit Spina bifida die Elternfragebogendaten mit der Leistung im CMR-K und im manuellen Training korreliert.

5.3 Ergebnisse

Mentale Rotationsfähigkeit (RT): Die Gruppe hatte einen signifikanten Effekt auf die RTs im Prätest, $F(1,30) = 20.78$, $p < .001$, $\eta^2 = .41$. Wie in Abbildung 25 illustriert ist, waren die Kinder mit Spina bifida langsamer als die gesunden Kinder. Auch die Winkeldisparität beeinflusste die RTs, $F(3,90) = 67.32$, $p < .001$, $\eta^2 = .69$. Wiederholte Kontraste zeigten, dass sich dabei jeder Winkel vom nächst höheren unterschied. Des Weiteren konnte eine signifikante Interaktion zwischen der Gruppe und der Winkel-

disparität gefunden werden, $F(3,90) = 3.9$, $p < .05$, $\eta^2 = .16$. Die Gruppenunterschiede nahmen mit steigender Winkeldisparität zu.

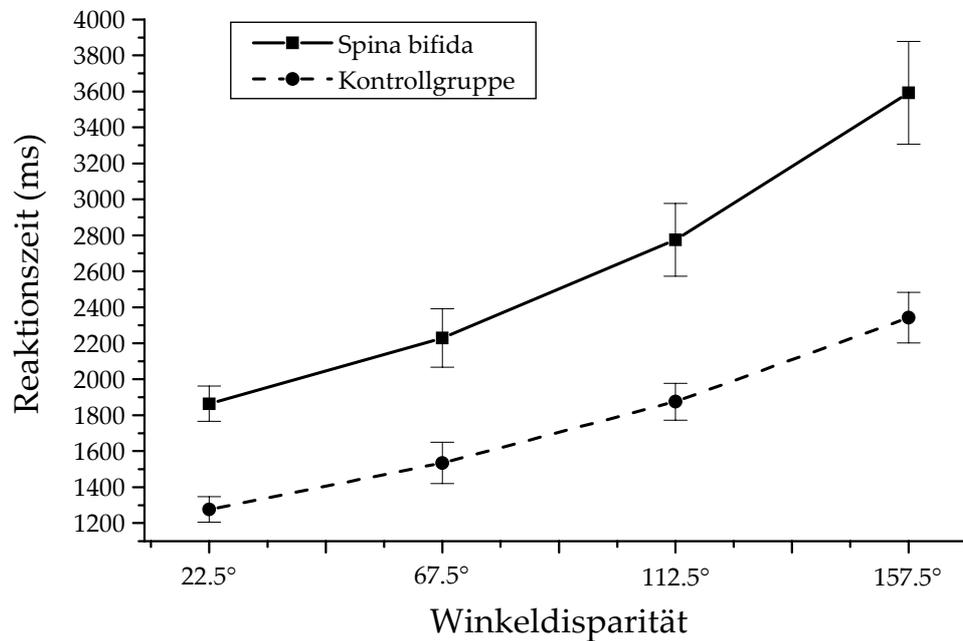


Abbildung 25: Reaktionszeit der Kinder mit Spina bifida und der Kontrollgruppe in Abhängigkeit von der Winkeldisparität. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die gemittelte Steigung der Regressionsgeraden lag bei 10.30 ms/Grad ($97.10^\circ/s$). Die beiden Gruppen unterschieden sich dabei signifikant, $F(1,30) = 5.89$, $p < .05$, $\eta^2 = .16$. Die Steigung der Kinder mit Spina bifida (12.73 ms/Grad) war höher als die der Kontrollgruppe (7.86 ms/Grad).

Mentale Rotationsfähigkeit (Fehler): Die Fehlerrate lag im CMR-K Prätest bei 11.26%. Die beiden Gruppen unterschieden sich signifikant in der Fehlerrate, $F(1,30) = 12.92$, $p < .001$, $\eta^2 = .30$ (siehe Tabelle 14). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Effekt, $F(1,90) = 12.48$, $p < .001$, $\eta^2 = .29$. Wiederholte Kontraste zeigten signifikante Unterschiede zwischen den letzten drei aufeinander folgenden Winkeln. Die Interaktion zwischen Gruppe und Winkeldisparität erwies sich als nicht signifikant, $F(3,90) = 3.27$, $p = .06$, $\eta^2 = .10$.

Tabelle 14

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Kinder mit Spina bifida und Kinder der Kontrollgruppe. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Spina bifida	2.22 (0.36)	3.00 (0.66)	3.58 (0.89)	7.88 (1.72)
Kontrollgruppe	0.66 (0.24)	0.66 (0.23)	1.96 (0.44)	2.60 (0.68)

Trainingseffekte (RT): Die Gruppe hatte einen signifikanten Effekt auf die RT-Differenzwerte, $F(1,30) = 4.64$, $p < .05$, $\eta^2 = .13$. Kinder mit Spina bifida zeigten größere Trainingsgewinne als die Kontrollgruppe (siehe Abbildung 26). Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss auf die RT-Differenzwerte, $F(3,90) = 10.97$, $p < .001$, $\eta^2 = .27$. Wiederholte Kontraste zeigten signifikante Unterschiede zwischen den ersten und den letzten beiden Winkeldisparitäten. Es wurde keine Interaktion zwischen der Gruppe und der Winkeldisparität gefunden, $F(3,90) = 1.59$, $p = .21$, $\eta^2 = .05$.

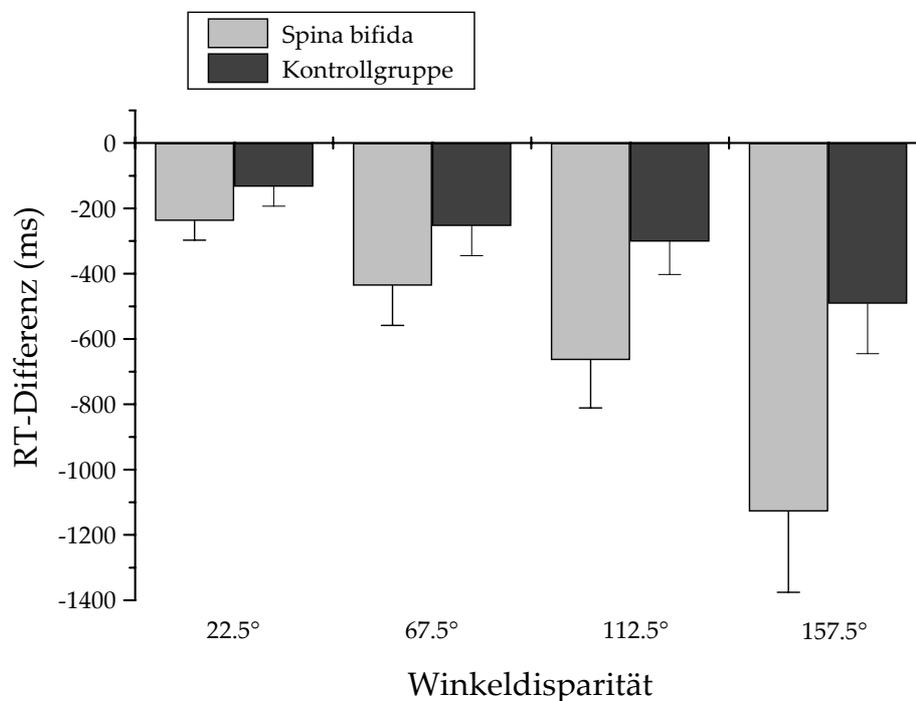


Abbildung 26: RT-Differenzwerte für die Kinder mit Spina bifida und die Kontrollgruppe abhängig von der Winkeldisparität. Negative Werte bedeuten schnellere Reaktionszeiten im Posttest. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Die RT-Differenzwerte für „alte“ und „neue“ Objekte unterschieden sich nicht, $F(1,30) = 0.36$, $p = .55$, $\eta^2 = .01$. Es gab keine Interaktionen zwischen der Art der Objekte und anderen Faktoren.

Die Berechnung der Regressionsgeraden im Posttest ergab eine gemittelte Steigung von 5.83 ms/Grad (171.53°/s). Unter Berücksichtigung der Steigung im Prätest unterschieden sich die Kinder mit Spina bifida (6.29 ms/Grad) dabei nicht von der Kontrollgruppe (5.37 ms/Grad), $F(1,30) = 1.56$, $p = .22$, $\eta^2 = .05$.

Trainingseffekte (Fehler): Die Gruppe hatte einen signifikanten Einfluss auf die Differenzwerte der Fehlerraten, $F(1,30) = 5.00$, $p < .05$, $\eta^2 = .14$. Tabelle 15 zeigt die Fehler-Differenzwerte für die Spina bifida- und die Kontrollgruppe. Es zeigte sich zudem ein Einfluss der Winkeldisparität, $F(3,90) = 4.95$, $p < .05$, $\eta^2 = .14$. Wiederholte Kontraste deckten auf, dass sich nur die zweite und dritte Winkeldisparität voneinander unterschieden. Die Fehler-Differenzwerte von „alten“ und „neuen“ Objekten unterschieden sich nicht, $F(1,30) = 0.77$, $p = .72$, $\eta^2 = .02$. Es gab keine Interaktionen zwischen den Faktoren.

Tabelle 15

Fehler-Differenzwerte in Abhängigkeit von der Winkeldisparität und getrennt für die Spina bifida- und die Kontrollgruppe. Negative Werte bedeuten niedrigere Fehlerraten im CMR-K Posttest. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Spina bifida	-0.78 (0.55)	-1.73 (0.73)	-2.08 (0.80)	-3.78 (1.28)
Kontrollgruppe	-0.23 (0.32)	0.19 (0.23)	-1.33 (0.37)	-1.73 (0.70)

Leistung im manuellen Training (Rotationszeit): Die beiden Gruppen unterschieden sich im Training signifikant in ihrer Rotationszeit, $F(1,30) = 12.46$, $p < .001$, $\eta^2 = .29$. Wie in Abbildung 27 deutlich wird, waren Kinder mit Spina bifida langsamer als gesunde Kinder. Auch die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Einfluss, $F(3,90) = 634.91$, $p < .001$, $\eta^2 = .96$. Wiederholte Kontraste zeigten signifikante Unterschiede zwischen

allen aufeinander folgenden Winkeln. Es wurde keine signifikante Interaktion zwischen der Gruppe und der Winkeldisparität gefunden, $F(3,90) = 0.63$, $p = .57$, $\eta^2 = .02$. Die Steigung der Regressionsgeraden betrug im Mittel 21.40 ms/Grad ($46.73^\circ/s$). Kinder mit Spina bifida unterschieden sich in der Steigung nicht von der Kontrollgruppe (Spina bifida: 21.81 ms/Grad; Kontrollgruppe: 20.99 ms/Grad; $F(1,30) = 0.41$, $p = .53$, $\eta^2 = .01$).

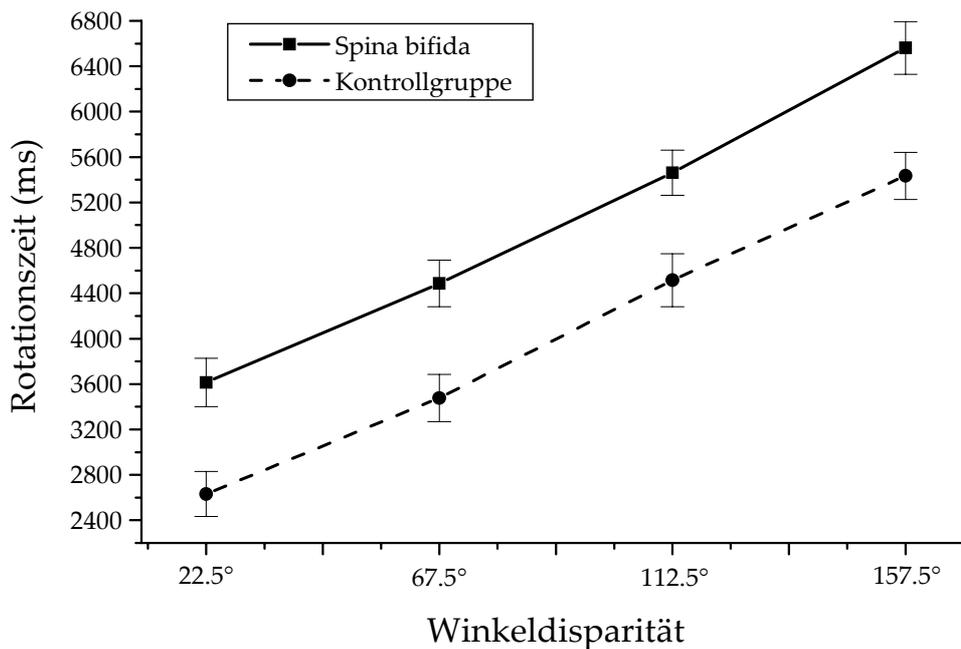


Abbildung 27: Rotationszeit im manuellen Training in Abhängigkeit von der Winkeldisparität für die Kinder mit Spina bifida und die Kontrollgruppe. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Leistung im manuellen Training (Fehler): Die mittlere Fehlerrate lag bei 2.23% ($SE = 0.71$). Die Gruppenzugehörigkeit beeinflusste die Fehlerrate nicht, $F(1,30) = 2.21$, $p = .15$, $\eta^2 = .07$. Die Winkeldisparität hatte einen signifikanten Effekt auf die Fehlerrate, $F(3,90) = 5.31$, $p < .05$, $\eta^2 = .15$ (siehe Tabelle 16). Wiederholte Kontraste zeigten signifikante Unterschiede zwischen den ersten drei Winkeldisparitäten. Die Interaktion zwischen der Gruppe und der Winkeldisparität erwies sich als nicht signifikant, $F(3,90) = 0.34$, $p = .78$, $\eta^2 = .01$.

Tabelle 16

Fehlerrate abhängig von der Winkeldisparität und getrennt für Kinder mit Spina bifida und die Kontrollgruppe. In Klammern sind Standardfehler des Mittelwerts angegeben.

	22.5°	67.5°	112.5°	157.5°
Spina bifida	0.13 (0.06)	0.65 (0.20)	0.42 (0.17)	0.49 (0.15)
Kontrollgruppe	0.46 (0.17)	0.98 (0.20)	0.52 (0.19)	0.81 (0.22)

Leistung im manuellen Training (rotierte Distanz): Die beiden Gruppen unterschieden sich nicht signifikant in der rotierten Distanz, $F(1,30) = 0.35$, $p = .56$, $\eta^2 = .01$. Die Winkeldisparität beeinflusste die rotierte Distanz, $F(3,90) = 3992.97$, $p < .001$, $\eta^2 = .99$, wobei wiederholte Kontraste Unterschiede zwischen allen aufeinander folgenden Winkeln zeigten. Richtig gedrehte Distanzen unterschieden sich von falsch gedrehten, $F(1,30) = 669.97$, $p < .001$, $\eta^2 = .96$, und es zeigte sich eine Interaktion der Richtung mit der Gruppe, $F(1,30) = 4.21$, $p < .05$, $\eta^2 = .12$. Während die Kinder mit Spina bifida längere Distanzen in die richtige Richtung drehen, drehen die gesunden Kinder längere Distanzen in die falsche Richtung (siehe Abbildung 28). Außerdem ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen der Winkeldisparität und der Richtung, $F(3,90) = 94.58$, $p < .001$, $\eta^2 = .76$.

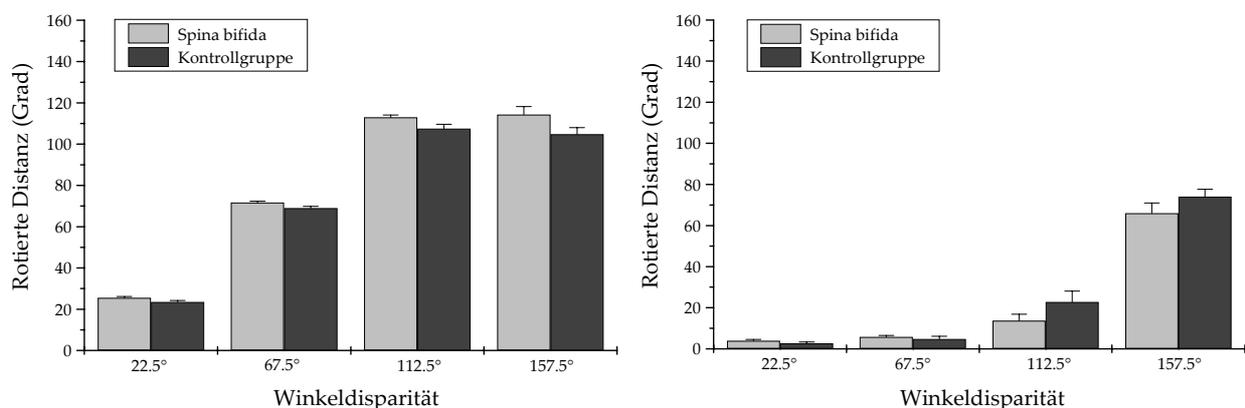


Abbildung 28: Rotierte Distanz in die richtige Richtung (linke Abbildung) und die falsche Richtung (rechte Abbildung) rotierte Distanz abhängig von der Winkeldisparität und der Gruppe. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler des Mittelwerts.

Korrelationen zwischen der mentalen und der manuellen Rotation: Die Rotationszeiten der manuellen Rotation korrelierten sowohl mit den RTs des CMR-K Prätests ($r = .65, p < .001$) als auch mit den RTs des Posttests ($r = .70, p < .001$). Die Korrelation der rotierten Distanz mit den RTs im Prätest betrug $r = .26$ ($p = .15$) und mit den RTs im Posttest $r = .44$ ($p < .05$); diese beiden Korrelationen erwiesen sich unter der Berücksichtigung der Interkorrelation (nach Meng et al., 1992) als nicht signifikant unterschiedlich ($Z = -1.67, p = .10$). Die getrennt Analyse der beiden Gruppen zeigte, dass die manuellen Rotationszeiten mit den RTs der mentalen Rotation für die Kinder mit Spina bifida im Prätest mit $r = .56$ ($p < .05$), im Posttest mit $r = .68$ ($p < .05$) korrelierten und für die Kontrollgruppe im Prätest mit $r = .39$ ($p = .14$) und im Posttest mit $r = .39$ ($p = .14$). Die Korrelationen zwischen der Spina bifida- und der Kontrollgruppe wurden mittels einer Umwandlung der Korrelationswerte in Fishers Z-Werte und einer anschließenden Berechnung des z-Wertes verglichen. Es zeigte sich, dass die beiden Gruppen sich – bei einem kritischen z-Wert von 1.96 – weder im Prätest ($z = 0.57$) noch im Posttest ($z = 1.07$) unterschieden. Die Steigungen der manuellen und mentalen Regressionsgeraden korrelierten nicht miteinander ($r = .16, p = .39$). In Bezug auf die Fehlerraten ergaben sich keine Korrelationen.

Korrelationen mit räumlich-kognitiven Fähigkeiten: Die RTs im CMR-K korrelierten (unter Auspartialisierung des Handlungs-IQs) signifikant mit der räumlichen Gedächtnisleistung ($r = -.35, p < .05$), der Leistung im CEFT ($r = -.33, p < .05$), sowie mit allen Variablen der Labyrinth-Aufgabe (Lerndurchgänge $r = .47, p < .05$; Fehler im Testdurchgang $r = .40, p < .05$; erinnerte Landmarken $r = -.35, p < .05$). Es konnten keine Zusammenhänge zwischen den Fehlerraten im Prätest oder den Variablen in der manuellen Rotation und den räumlich-kognitiven Tests gefunden werden.

Korrelationen mit den Elternfragebogendaten: Das Alter, in dem die Spina bifida-Kinder (mit oder ohne Hilfe) laufen lernten, korrelierte nur mit der Fehlerrate in der manuellen Rotationsaufgabe signifikant ($r = .73, p < .05$). Mit der Fehlerrate im Prätest der mentalen Rotation korrelierte die Einschätzung der Mathematikleistung ($r = .63, p < .05$) und der Konzentrationsfähigkeit ($r = .60, p < .05$).

5.4 Diskussion

Zum ersten Mal überhaupt wurde die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida systematisch und umfassend untersucht. Es zeigte sich, dass diese Kinder in der Lage sind, mental zu rotieren. Wie angenommen wurde, sind Kinder mit Spina bifida dabei langsamer und machen mehr Fehler als eine nach Alter, Geschlecht und Verbal-IQ zugeordnete Kontrollgruppe gesunder Kinder. Bei der genaueren Analyse der Reaktionszeiten wurde aufgedeckt, dass Kinder mit Spina bifida eine niedrigere mentale Rotationsgeschwindigkeit zeigten.

In der manuellen Rotationsaufgabe konnten ähnliche Unterschiede zwischen den Gruppen wie in der mentalen Rotationsaufgabe aufgezeigt werden. Die Rotationszeiten nahmen mit steigender Winkeldisparität zu. Kinder mit Spina bifida hatten längere Rotationszeiten, was jedoch nicht durch die manuelle Rotationsgeschwindigkeit begründet war. Kinder mit Spina bifida brauchen demnach für andere beteiligte kognitive Prozesse länger als gesunde Kinder. Die mentale und die manuelle Rotation schienen sowohl bei den Kindern mit Spina bifida als auch bei den gesunden Kindern in einem engen Zusammenhang zu stehen.

Dass es sich bei der mentalen Rotation keineswegs um einen unabhängigen Faktor der räumlichen Fähigkeiten zu handeln scheint, wird angesichts der Zusammenhänge mit anderen räumlichen Aufgaben deutlich. Vor allem mit den Leistungen in der Untersuchung zum räumlichen Wissen in einem Umgebungsraum konnten deutliche Beziehungen aufgezeigt werden. Des Weiteren scheinen Kinder in der manuellen Rotation desto ungenauer zu sein, je später es ihnen in ihrer frühkindlichen Entwicklung möglich war, (mit oder ohne Hilfe) zu laufen.

Sowohl die Kinder mit Spina bifida als auch die Kontrollgruppe profitierten vom manuellen Training: Die Differenzwerte indizierten niedrigere Reaktionszeiten im Posttest der mentalen Rotation als im Prätest. Dabei konnte die Annahme bestätigt werden, dass die Spina bifida-Gruppe in einem höheren Maße als die gesunden Kinder vom manuellen Training profitieren. Der Trainingseffekt war zudem nicht objektspezifisch und beruhte somit auf der Verbesserung des mentalen Rotationspro-

zesses an sich. Die größeren Trainingsgewinne der Spina bifida-Kinder galten sowohl für Reaktionszeiten als auch für Fehlerraten. Die Ergebnisse werden ausführlich und unter Anwendungsbezug in der folgenden Abschlussdiskussion erläutert.

6 Abschlussdiskussion

Im letzten Teil dieser Arbeit werden die Befunde der vorgestellten Experimente zusammengefasst und diskutiert. Während die Ergebnisse der Experimente 1 bis 3 gemeinsam diskutiert werden und der Fokus dabei auf kognitionspsychologischen Aspekten liegt, wird das Experiment 4 gesondert unter einem Anwendungsbezug betrachtet. Des Weiteren wird ein Ausblick auf Fragestellungen gegeben, die sich aus den berichteten Experimenten ergeben.

6.1 Der computerbasierte mentale Rotationstest

Experiment 1 diente dazu, den hier entwickelten computerbasierten mentalen Rotationstest zu evaluieren und zu validieren. Mit über 100 erwachsenen Versuchspersonen wurden der MRT (Vandenberg & Kuse, 1978), ein Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation, und der computerbasierte mentale Rotationstest durchgeführt. Da der MRT im klinischen und im experimentellen Bereich als Standardinstrument zur Messung der mentalen Rotation gilt, wurde die konvergente Validität des computerbasierten mentalen Rotationstests als Korrelation zwischen den beiden Testverfahren errechnet. Sowohl für die Reaktionszeiten als auch für die Fehlerraten ergaben sich hohe Korrelationen mit den Punktwerten im MRT. Der computerbasierte mentale Rotationstest bietet gegenüber dem MRT einige Vorteile: Es können unabhängig voneinander Reaktionszeiten und Fehler gemessen werden, während im MRT nur ein gemeinsamer Punktwert gebildet wird. Da es sich beim MRT um einen *Speed-Power*-Test handelt und nur die richtig beantworteten Items gezählt werden, setzt sich der Punktwert aus der Bearbeitungszeit und den Fehlern zusammen. Durch die unabhängige Messung von Reaktionszeit und Fehlerzahlen lassen sich Effekte abbilden, die spezifisch auf die Reaktionszeit oder die Fehlerzahlen wirken, wie es zum Beispiel bei einem Rotationstraining der Fall zu sein scheint (z.B. Leone et al., 1993). Des Weiteren kann im computerbasierten mentalen Rotationstest der Einfluss der Winkeldisparität erfasst werden. So lassen sich spezifische Effekte einzelner Stimuli

nachweisen oder es lassen sich die Reaktionszeiten von Objekten, die im Training gelernt wurden und neuen, nicht gelernten Objekten unterscheiden. Zur detaillierten Analyse der Reaktionszeiten lässt sich zusätzlich für jede einzelne Versuchsperson eine Regressionsgerade zwischen Winkeldisparität und Reaktionszeit berechnen. Ebenfalls kann die Steigung beziehungsweise die mentale Rotationsgeschwindigkeit gemittelt und zwischen den einzelnen Gruppen verglichen werden. Die Steigung der mentalen Rotationsfunktion bildet dabei den Rotationsprozess an sich ab, der Cooper und Shepard (1973) zufolge unabhängig von den anderen beteiligten Prozessen wie der Enkodierung und dem Vergleich der Stimuli ist. Es zeigte sich, dass der MRT nur schwach mit der mentalen Rotationsgeschwindigkeit im computerbasierten mentalen Rotationstest korreliert war. Der MRT scheint demnach stark von Prozessen beeinflusst zu sein, die sich vom mentalen Rotationsprozess an sich unterscheiden. So könnten durch die Präsentation von vier Vergleichsfiguren pro Durchgang im MRT Enkodierungs- und Vergleichsprozesse eine größere Bedeutung haben als im computerbasierten mentalen Rotationstest.

In Experiment 3 wurden auch für Kinder Korrelationen zu einem anderen Messverfahren der mentalen Rotation, einem kurzen Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation (aus Lohaus et al., 1999), berechnet. Es wurden keine Korrelationen zwischen dem Papier- und Bleistift-Test und dem computerbasierten mentalen Rotationstest gefunden. Der Papier- und Bleistift-Test enthält jedoch nur acht Items, die mit einer Ratewahrscheinlichkeit von 50% richtig zu lösen sind und kann daher kaum als reliabel angesehen werden. In einer Studie von Waber et al. (1982) mit zehn- und zwölfjährigen Kindern zeigte sich, dass kein enger Zusammenhang zwischen einem chronometrischen mentalen Rotationstest mit Buchstaben und einem Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation besteht: Eine Korrelation wurde nur für die Fehlerzahl im chronometrischen Test gefunden, nicht aber für die Reaktionszeiten.

In Experiment 1 stieg die Reaktionszeit mit steigender Winkeldisparität. Dieser Anstieg ist nach Shepard und Metzler (1971) als Beweis dafür zu betrachten, dass Versuchspersonen mental rotierten, um die Aufgabe zu lösen. Die mentale Rotationsgeschwindigkeit betrug $83.96^\circ/\text{s}$ und lag somit im Bereich der Studie von Shepard und

Metzler (60°/s) und anderen Studien mit dreidimensionalen Blockfiguren (siehe Shepard & Metzler, 1988). Mit steigender Winkeldisparität stieg auch die Anzahl der Fehler (vergleiche z.B. Cooper, 1975; Voyer, 1995; Wraga et al., 2003).

Aufgrund der Resultate in Experiment 1 wurde die mentale Rotationsfähigkeit in den anschließenden Experimenten mittels des computerbasierten mentalen Rotationstests erfasst. Dabei konnte sowohl für Erwachsene als auch für Kinder ein Anstieg der Reaktionszeiten und der Fehlerrate mit zunehmender Winkeldisparität aufgezeigt werden. Die mittlere Rotationsgeschwindigkeit betrug bei Erwachsenen 86.68°/s, was der Geschwindigkeit in Experiment 1 und in anderen Studien (z.B. Leone et al., 1993; Shepard & Metzler, 1971; Shepard & Metzler, 1988) entsprach. Bei der Rotation von zweidimensionalen Bildern erreichten die Kinder in Experiment 3 eine Rotationsgeschwindigkeit von 137.9°/s, was ebenfalls im Bereich der Geschwindigkeiten in anderen Studien mit Kindern in ähnlichem Alter lag (Marmor, 1975; Kail et al., 1980).

Der computerbasierte mentale Rotationstest scheint ein valides Testinstrument zu sein. Die Ergebnisse der Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit entsprechen denen anderer Studien und korrelierten hoch mit der Leistung im MRT. Der computerbasierte mentale Rotationstest wurde in den Experimenten 2 bis 4 zur Messung der mentalen Rotationsfähigkeit vor und nach dem manuellen Rotationstraining eingesetzt.

6.2 Leistung in der manuellen Rotation

Die Befunde in der manuellen Trainingsaufgabe ähnelten sehr stark den Ergebnissen des mentalen Rotationstests: Sowohl für Erwachsene als auch für Kinder stieg die Rotationszeit und die Fehlerrate mit ansteigender Winkeldisparität. Die Zunahme der Rotationszeit mit ansteigender Winkeldisparität ist vor allem auf der ansteigenden Distanz zwischen der Ausgangsstellung des Stimulus und dem Soll-Zustand begründet: Die manuelle Drehung um längere Distanzen benötigt mehr Zeit. Bei der Fehlerrate ist die Interpretation schwierig, da eine manuelle Rotation um große Win-

keldisparitäten nicht komplizierter sein sollte als um kleine Winkeldisparitäten. Anscheinend wurden die Versuchspersonen ungenauer bei größeren Winkeldisparitäten.

Zur genaueren Analyse der manuellen Rotationsleistung wurden Regressionsgeraden zwischen der Rotationszeit und der Winkeldisparität gebildet. Die mittlere Rotationsgeschwindigkeit betrug $43.5^\circ/\text{s}$ für die Erwachsenen beziehungsweise $49.5^\circ/\text{s}$ für die Kinder und lag somit unterhalb der Geschwindigkeit in der mentalen Rotation. Langsamere Geschwindigkeiten in der manuellen Aufgabe sind mit der Translationseinstellung des Joysticks zu erklären: Anhand der mentalen Rotationsgeschwindigkeit in der Studie von Shepard und Metzler (1971) wurde die Höchstgeschwindigkeit auf $60^\circ/\text{s}$ festgesetzt.

Es kann angenommen werden, dass bei der Ausführung einer manuellen Rotation dieselben Prozesse beteiligt sind wie bei der Ausführung einer mentalen. Die Stimuli werden enkodiert und daraufhin rotiert; ein Vergleichsprozess stoppt den (manuellen) Rotationsprozess, sobald die korrekte Winkelstellung erreicht ist, und eine Antwort in Form eines Knopfdrucks erfolgt. Unterschiede zur mentalen Aufgabe bestehen neben der Rotation an sich insbesondere im Vergleichsprozess. Während in der mentalen Rotation zwischen „identisch“ und „gespiegelt“ entschieden werden muss, gibt es in der manuellen Aufgabe nur identische Durchgänge. Der Vergleichsprozess beinhaltet somit bei der manuellen Rotation nur den Abgleich der räumlichen Lage zwischen Standard- und Vergleichsobjekt, was die kognitive Anforderung verringern sollte. Dennoch sind die Rotationszeiten bei der manuellen Aufgabe deutlich höher als die Reaktionszeiten der mentalen Aufgabe. Da die Rotationszeiten schon bei der kleinsten Winkeldisparität im Vergleich zu den Reaktionszeiten in der mentalen Rotationsaufgabe erhöht waren, kann ausgeschlossen werden, dass der Zeitunterschied allein auf der Rotationsgeschwindigkeit beruht. Es kann nicht bestimmt werden, welche Komponenten des manuellen Rotationsprozesses länger dauern als bei der mentalen Rotation (Cooper & Shepard, 1973). Die höheren Rotationszeiten in der manuellen Rotation könnten zudem auf der Feineinstellung der Winkelstellung basieren. In einem weiterführenden Experiment sollten die einzelnen Komponenten

der manuellen Rotation genauer untersucht werden. Es müssten die folgenden Reaktionszeiten gemessen werden: (a) von Beginn der Präsentation der Stimuli bis zum Beginn der Rotation, (b) Dauer der Rotation und (c) Ende der Rotation bis zur Antwort. Damit könnte zum Beispiel analysiert werden, ob die Versuchspersonen zu Beginn der Stimuluspräsentation eine mentale Rotation ausführen, um zu entscheiden, in welche Richtung manuell rotiert werden muss (es müsste sich dann eine mentale Rotationsfunktion für den ersten Zeitabschnitt finden lassen). Aufgrund der Annahme, dass bei der mentalen Rotation dieselben Prozesse ablaufen wie bei der manuellen Rotation, könnte die Analyse der Reaktionszeiten einzelner Komponenten bei der manuellen Rotation auch Rückschlüsse auf die Dauer derselben Komponenten bei der mentalen Rotation zulassen.

Die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 zeigen, dass deutliche Zusammenhänge zwischen der mentalen und der manuellen Rotation bestehen. Neben Ähnlichkeiten in Bezug auf die Rotationsfunktionen konnten auch Korrelationen zwischen den beiden Rotationsarten gefunden werden. Je höher die Reaktionszeiten der Erwachsenen in Experiment 2 in der mentalen Rotation waren, desto höher waren die Rotationszeiten in der manuellen Rotation. Außerdem standen die Rotationsgeschwindigkeiten beider Rotationsarten in einem engen Zusammenhang: Je schneller die Versuchspersonen in der mentalen Rotation waren, desto schneller waren sie auch in der manuellen Rotation. In Experiment 2 konnte zudem gezeigt werden, dass Versuchspersonen, die in der mentalen Rotation langsamer sind, um längere Distanzen in der manuellen Aufgabe rotierten. Diese Ergebnisse bestätigen die Annahmen, dass die mentale Rotation eine verdeckte motorische Rotation ist (Wexler et al., 1998) und ein gemeinsamer Prozess die mentale und motorische Rotation kontrolliert (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). In Experiment 3 konnte bei den Kindern nur für die Fehlerraten eine Korrelation zwischen der mentalen und der manuellen Rotation aufgezeigt werden. Die Ergebnisse von Frick et al. (2005), die einen engeren Zusammenhang zwischen manueller und mentaler Rotation bei Kindern als bei Erwachsenen belegen, können aufgrund der hier präsentierten Ergebnisse nicht bestätigt werden. Allerdings zeigten in der Studie von Frick et al. nur Kinder im Alter von fünf und acht Jahren eine enge Beziehung zwischen mentaler und manueller Rotation; Elfjährigen

und Erwachsenen gelang es offenbar motorische und mentale Prozesse zu entkoppeln. Es scheinen demnach Unterschiede zwischen verschiedenen Altersgruppen zu bestehen; somit könnte angenommen werden, dass jüngere Kinder einen engeren Zusammenhang zwischen der mentalen Rotationsleistung und der Leistung im manuellen Training zeigen würden. Um weiterführende Erkenntnisse zu gewinnen, sollten zusätzlich zu den Zehn- und Elfjährigen wie in Experiment 3 andere Altersgruppen – jüngere und ältere Kinder – untersucht werden.

Wohlschläger und Wohlschläger (1998) konnten anhand ihrer motorischen Rotationsdaten belegen, dass Versuchspersonen sich nicht immer für den richtigen, kürzeren Rotationsweg entscheiden. Besonders groß war die Häufigkeit einer Drehung in die falsche Richtung je näher die zu rotierende Distanz an 180° reichte (wobei es bei der Winkeldisparität 180° natürlich keine Rolle spielt, in welche Richtung gedreht wird). Ähnliche Befunde zeigten sich in der hier verwendeten manuellen Rotationsaufgabe: Mit steigender Winkeldisparität stieg sowohl die „richtig“ als auch die „falsch“ rotierte Distanz. Dabei basierte die falsch rotierte Distanz sowohl auf Feineinstellungen in jedem Durchgang als auch auf komplett falsch rotierten Durchgängen. Bei der größten verwendeten Winkeldisparität (157.5°) ist auf den ersten Blick nicht sofort erkennbar, welches der kürzere Weg ist, weshalb wahrscheinlich viele Versuchspersonen um den längeren Weg rotierten. Bei der Annahme einer Analogie zwischen der mentalen und der manuellen Rotation kann aufgrund dieser Ergebnisse vermutet werden, dass auch bei mentalen Rotationsaufgaben Versuchspersonen bei einigen Durchgängen um längere Wege rotieren.

6.3 Einfluss des Geschlechts auf die mentale und manuelle Rotation

Wie in der Einleitung beschrieben, zeichnen die Ergebnisse von Studien, die Geschlechtsunterschiede der mentalen Rotationsfähigkeit untersuchen, ein heterogenes Bild auf. Männer erzielen in Papier- und Bleistift-Tests der mentalen Rotation höhere Leistungen als Frauen (z.B. Linn & Petersen, 1985). Es war deshalb erwartet worden,

dass Männer in der hier durchgeführten Studie im MRT besser abschneiden als Frauen (Experiment 1). In Bezug auf die Leistung im computerbasierten mentalen Rotationstest waren keine Vorhersagen über die differentielle Leistung von Männern und Frauen getroffen worden, da Untersuchungen mit dem Shepard und Metzler-Paradigma heterogene Befunde aufweisen (z.B. Voyer et al., 1995).

In Experiment 1 wurde im MRT tatsächlich eine deutlich bessere Leistung der Männer gefunden. Auch im computerbasierten mentalen Rotationstest schnitten Männer besser ab, was sowohl für Reaktionszeiten und als auch für Fehlerraten galt. Die Effektstärke für den Geschlechtsunterschied war im MRT höher als im computerbasierten mentalen Rotationstest. Bei der Analyse der Regressionsgeraden zeigte sich, dass die höheren Reaktionszeiten der Frauen nicht auf der Steigung beruhten. Diese Ergebnisse sind widersprüchlich zur Studie von Bryden et al. (1990), die in der Steigung einen höheren Wert der Frauen finden konnten. Während die Ergebnisse von Bryden et al. nahe legen, dass Frauen im mentalen Rotationsprozess an sich langsamer sind, weisen die Ergebnisse der hier durchgeführten Studie darauf hin, dass die längeren Reaktionszeiten für Frauen eher auf anderen Prozessen wie der Enkodierung und dem Vergleich der Stimuli beruhen. Während der Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten und dem MRT-Wert in Experiment 1 unabhängig vom Geschlecht auftrat, korrelierte die Fehlerrate mit dem MRT-Wert nur für die Frauen. Da Männer im computerbasierten mentalen Rotationstest kaum Fehler machten, ist davon auszugehen, dass dies auch im MRT der Fall ist. Deshalb könnte der MRT-Wert für Männer nicht auf Fehlern, sondern fast ausschließlich auf der Bearbeitungszeit beruhen. Männliche Versuchspersonen zeigten einen Zusammenhang zwischen dem MRT-Wert und der Steigung im computerbasierten mentalen Rotationstest, Frauen dagegen nicht. Bei Männern scheint demnach eine höhere Leistung im MRT auf einer höheren mentalen Rotationsgeschwindigkeit zu beruhen, bei Frauen eher auf einer besseren Leistung in anderen Prozessen wie der Enkodierung und dem Vergleich der Stimuli. In weiteren Studien sollte untersucht werden, welcher dieser Prozesse die Leistung der Frauen im MRT beeinflusst. Dafür könnten zum Beispiel Aufgaben zur bloßen Enkodierung von Stimuli mit der Leistung im MRT korreliert werden.

Im Gegensatz zu Experiment 1 fand sich kein Geschlechtsunterschied in der mentalen Rotationsfähigkeit in Experiment 2. Männer waren jedoch in der manuellen Rotationsaufgabe schneller als Frauen. Die Berechnung der Regressionsgeraden zeigte, dass der Geschlechtsunterschied in der manuellen Rotation nicht auf unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten basierte. Die Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen von Rizzo und Kollegen (Parsons et al., 2004; Rizzo et al., 2001), die zwar Geschlechtsunterschiede im MRT, aber nicht in einem computerbasierten manuellen Rotationstraining fanden. Die Autoren gingen davon aus, dass die unterschiedliche Stimuluskomplexität im MRT und im manuellen Training dafür ausschlaggebend gewesen sein könnte. Die vielfältigen Unterschiede zwischen dem MRT und dem manuellen Training wurden bereits in Abschnitt 1.4.3 diskutiert. In den hier durchgeführten Experimenten wurden deshalb die mentale und manuelle Rotation so ähnlich wie möglich gehalten. In der Studie von Rizzo und Kollegen war es außerdem möglich, die dreidimensionalen Würfelobjekte im virtuellen Raum sowohl in der Bildebene und als auch in der Bildtiefe zu rotieren. Durch die Rotation im dreidimensionalen virtuellen Raum wird die Aufgabe um einiges schwieriger (siehe Ruddle & Jones, 2001), was das Fehlen eines Geschlechtseffektes auch durch einen Bodeneffekt erklären könnte.

Die oben vorgeschlagene Studie zur Zeitmessung der einzelnen Komponenten der manuellen Rotation könnte auch für die mentale Rotation Aufschluss darüber geben, ob Frauen eher für den Enkodierungs- oder Vergleichsprozess beziehungsweise die Feineinstellung mehr Zeit benötigten als Männer. Einige Studien gehen davon aus, dass Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotation durch den Gebrauch unterschiedlicher Strategien entstehen (z.B. Casey, 1996; Jordan et al., 2002). Demnach bevorzugen Frauen analytische Strategien und Männer holistische. Experiment 2 könnte als Widerlegung dieser These verstanden werden: In einer manuellen Rotationsaufgabe werden die Stimuli aufgrund der Visualisierung holistisch verarbeitet und es dürften keine Strategieunterschiede und somit keine Zeitunterschiede zwischen Männern und Frauen auftreten. Einschränkend muss festgestellt werden, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass Versuchspersonen auch in der manuellen Rotation analytisch nur die Drehung einzelner Segmente verfolgten.

In Experiment 3 unterschieden sich Jungen und Mädchen im Alter von zehn und elf Jahren in ihrer mentalen Rotationsfähigkeit. Jungen erzielten sowohl im Papier- und Bleistift-Test als auch im computerbasierten mentalen Rotationstest eine bessere Leistung als Mädchen, was einer Reihe von Studien mit Kindern widerspricht, die das Shepard und Metzler-Paradigma verwendeten (z.B. Marmor, 1975, 1977; Roberts & Bell, 2000b; Estes, 1998; Platt & Cohen, 1981; Kosslyn et al., 1990; Waber et al., 1982). Der Geschlechtseffekt zeigte sich im computerbasierten mentalen Rotationstest nicht in der mentalen Rotationsgeschwindigkeit und beruhte somit auf Prozessen wie der Stimulusenkodierung und dem Stimulusvergleich. Im Posttest des computerbasierten mentalen Rotationstests dagegen unterschieden sich die Geschlechter in der Rotationsgeschwindigkeit, und zwar unabhängig von der Art der vorherigen Intervention. Die Diskrepanz zwischen Jungen und Mädchen im Posttest scheint demnach nicht auf das Training, sondern eher auf die Wiederholung der mentalen Rotationsaufgabe zurückzugehen. In der manuellen Aufgabe zeigten Jungen und Mädchen die gleiche Leistung. Geschlechtsunterschiede scheinen demnach bei Kindern zu verschwinden, wenn die Aufgabe eine externale, motorische Rotation erfordert und der Prozess der Rotation visualisiert wird.

6.4 Effekte des manuellen Rotationstrainings

Die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 zeigen, dass das hier entwickelte manuelle Rotationstraining die mentale Rotationsfähigkeit verbessert. Die Differenzwerte der Reaktionszeiten zwischen Prä- und Posttest waren deutlich größer für die Trainingsgruppe als für die Kontrollgruppe, die in gleicher Zeit ein nicht-räumliches Computerspiel spielte. Das manuelle Training hatte jedoch keinen Effekt auf die Fehlerraten, was sich mit Befunden aus anderen Studien deckt (z.B. Kail & Park, 1990; Leone et al., 1993). Ein Zustandekommen des Trainingsgewinns der Reaktionszeiten durch einen *Speed-Accuracy Trade-Off* kann ausgeschlossen werden, da die Fehler-Differenzwerte weder für Erwachsene noch für Kinder in der Kontrollgruppe höher als in der Trainingsgruppe waren. Weder in Experiment 2 noch in Experiment 3 lie-

ßen sich die Trainingseffekte auf die Steigung der Regressionsgeraden abbilden. Somit kann keine Aussage gemacht werden, ob der Trainingseffekt eher auf der Beschleunigung des mentalen Rotationsprozesses an sich oder auf der Beschleunigung der anderen beteiligten Prozesse beruht (Cooper & Shepard, 1973). Es kann vermutet werden, dass das Training zu kurz war, um spezifische Effekte auf die Steigung hervorzurufen.

In den nächsten Abschnitten werden die Trainingseffekte weitergehend diskutiert. Zunächst wird auf die Objektspezifität, danach auf die potentiellen Wirkungskomponenten und abschließend auf differentielle Effekte eingegangen.

6.4.1 Objektspezifität des Rotationstrainings

Um die Grundlage des Trainingseffektes genauer zu untersuchen, wurden die Reaktionszeiten zwischen vorher im Training gelernten und „neuen“ Objekten verglichen. Es wurde angenommen, dass der Effekt eines manuellen Trainings nicht auf gelernten Objekten beruht. Während das Training bei Erwachsenen zu objektspezifischen Effekten zu führen scheint, konnten bei Kindern tatsächlich keine gedächtnisbasierten Prozesse nachgewiesen werden. Das manuelle Training verbessert somit bei Kindern die mentale Rotationsfähigkeit an sich. Die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 werden getrennt diskutiert.

6.4.1.1 Diskussion objektspezifischer Trainingseffekte bei Erwachsenen

Es zeigte sich, dass der Trainingseffekt in Experiment 2 auf schnelleren Reaktionszeiten für Objekte beruht, die vorher im Training gelernt wurden. In Übereinstimmung mit Studien zum Training der mentalen Rotation durch extensive Übung mentaler Rotationsaufgaben (Heil et al., 1998; Tarr & Pinker, 1989) scheint der Effekt eines kurzen manuellen Trainings demnach objektspezifisch zu sein. Die Annahme, dass der Effekt eines manuellen Trainings nicht auf Gedächtnisprozessen basiert, kann somit bei Erwachsenen nicht bestätigt werden. Es bleibt jedoch ungeklärt, was im Gedächtnis gespeichert und später abgerufen wird: Die Befunde, dass die Steigung der mentalen Rotationsgeraden durch die extensive Ausführung mentaler Rotationen gegen Null strebt und dass der Trainingseffekt orientierungsspezifisch ist (z.B.

Tarr & Pinker, 1989), weisen darauf hin, dass die exakte Stimuluskonfiguration gespeichert wird. Bei der Präsentation gelernter Stimuluskonfigurationen würde somit ein direkter Gedächtniszugang bestehen, der einen mentalen Rotationsprozess überflüssig machen würde. In einem manuellen Training wird der Prozess der Rotation jedoch visualisiert und das rotierte Objekt somit nicht in distinkten Winkelstellungen wahrgenommen, was zu einer orientierungsunabhängigen Objektrepräsentation führen sollte. In Experiment 2 wurde im Posttest zwar ein objektspezifischer Trainingseffekt gefunden, eine typische mentale Rotationsfunktion konnte aber dennoch aufgezeigt werden und die Steigungen der Regressionsgeraden für „alte“ und „neue“ Objekte unterschieden sich nicht zwischen der Experimental- und der Kontrollgruppe. Das manuelle Training scheint demnach nicht zu einer orientierungsunabhängigen Repräsentation trainierter Objekte geführt zu haben, durch die der Prozess der mentalen Rotation alleinig durch direkten Abruf erfolgen würde. Trotz der Objektspezifität des Trainingseffektes kann demnach nicht inferiert werden, dass die mentale Rotation vollständig durch Gedächtnisprozesse ersetzt wurde. Es kann vielmehr angenommen werden, dass alle Komponenten der mentalen Rotation (nach Cooper & Shepard, 1973) von vorhandenen Gedächtnisrepräsentationen der Objekte profitieren.

Bei näherer Betrachtung der Daten lässt sich auch eine alternative Interpretation des Trainingseffektes nicht ausschließen. Die Reaktionszeit-Differenzwerte der Kontrollgruppe unterschieden sich zwischen „alten“ und „neuen“ Objekten, was erstaunlich ist, da für die Kontrollgruppe alle Objekte „neu“ waren. Daraus ist zu schließen, dass die „alten“ Objekte schwieriger zu verarbeiten waren als die „neuen“. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurden *post hoc* die Reaktionszeiten aus Experiment 1 analysiert. Tatsächlich waren Reaktionszeiten für die Objekte länger, die in Experiment 2 im Training benutzt wurden als für die nicht im Training benutzten, $t(101) = 9.02$, $p < .001$. Dieser Unterschied ist unerwartet, da die Objekte nach strengen Kriterien erstellt und zufällig ausgewählt worden waren. Die Analyse des Trainingseffektes wurde dadurch jedoch nicht beeinflusst, da der Trainingseffekt durch den Vergleich der Differenzwerte zwischen Prä- und Posttest der Experimental- mit der Kontrollgruppe erfasst wurde. Das Ausbleiben eines Trainingseffektes für „neue“ Objek-

te könnte auch darauf beruhen, dass diese Objekte weniger komplex waren. Bethell-Fox und Shepard (1988) zeigten, dass die Leistung in der mentalen Rotation nach einem Training zwar immer noch von der Winkeldisparität abhängig war, jedoch nicht mehr von der Komplexität der Stimuli. Besonders für komplexe Stimuli sank die Reaktionszeit nach einem Training. Wie in der Einleitung bereits beschrieben, nahmen Bethell-Fox und Shepard an, dass komplexe Stimuli erst nach einem Training holistisch verarbeitet werden können, was die Verringerung der Reaktionszeiten erklären würde. Im hier vorliegenden manuellen Training wird der Prozess der Objektrotation visualisiert, womit eine holistische Strategie induziert worden sein könnte. Die Experimentalgruppe könnte so insbesondere für „alte“ – komplexere – Objekte vom manuellen Training profitiert haben, während die Kontrollgruppe diese Objekte auch im Posttest analytisch rotierte. Beide Gruppen könnten dagegen einfachere Objekte im Prä- und Posttest der mentalen Rotation holistisch rotiert haben. Diese Alternativerklärung steht nicht im Widerspruch zur Interpretation der Ergebnisse im Rahmen von Gedächtnisprozessen: Das Lernen von im Training präsentierten Objekten könnte die Wahrscheinlichkeit eines direkten Gedächtnisabrufs erhöhen und gleichzeitig den Erwerb einer holistischen Strategie fördern.

6.4.1.2 Diskussion objektunabhängiger Trainingseffekte bei Kindern

Es war davon ausgegangen worden, dass bei Kindern ein Trainingseffekt nicht auf Stimuli, die im Training gelernt wurden, beschränkt sein sollte, da die Beziehung zwischen mentaler und motorischer Rotation bei Kindern noch enger zu sein scheint als bei Erwachsenen (Frick et al., 2005; Funk et al., 2005). Tatsächlich war der Trainingseffekt in Experiment 3 nicht auf Objekte begrenzt, die vorher im Training gelernt wurden. Demnach beruht die Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit nach dem Training bei Kindern auf einer schnelleren Ausführung des mentalen Rotationsprozesses an sich und nicht auf dem Abruf gespeicherter Information. Diese Ergebnisse sind konträr zu den Befunden der Studie von Kail und Park (1990), in der ausschließlich objektspezifische Übungseffekte nach extensiver Ausführung mentaler Rotationen gefunden wurden. Im Kinderbereich scheint demnach ein manuelles Rotationstraining einem mentalen Training klar überlegen zu sein. Die Unterschiede

zwischen den beiden Trainingsmethoden sind jedoch nicht nur auf die Art der Rotation beschränkt: Die Länge des Trainings könnte einen Einfluss auf die Objektspezifität haben. Während die Kinder in der Studie von Kail und Park über 3000 mentale Rotationen bearbeiteten, waren es im hier vorgestellten manuellen Training 192, wobei jeder Stimulus in verschiedenen Winkeldisparitäten insgesamt zwölf Mal präsentiert wurde. Es könnte vermutet werden, dass bei Kindern diese Präsentationsanzahl nicht ausreicht, um eine stabile Gedächtnisrepräsentation auszubilden. In der Studie von Kail und Park stieg die Rotationsgeschwindigkeit der Kinder in der Trainingsgruppe von $212^\circ/\text{s}$ auf $1200^\circ/\text{s}$, während die Geschwindigkeitszunahme hier geringer war ($125^\circ/\text{s}$ auf $209^\circ/\text{s}$). Dabei ist zu beachten, dass der Trainingseffekt in der hier präsentierten Arbeit nicht als Unterschied zwischen Prä- und Posttest, sondern als Differenz zwischen der Trainings- und der Kontrollgruppe definiert wurde (siehe hierzu auch Lipsey & Wilson, 1993).

Hinweise, dass Kinder in der Lage sind, den mentalen Rotationsprozess an sich zu trainieren, stammen von Studien, die den Effekt räumlicher Computerspiele auf die mentale Rotationsfähigkeit untersuchen (McClurg & Chaillé, 1987; Okagaki & Frensch, 1994; Souvignier, 2000). Die Befundlage dieser Studien ist jedoch nicht sehr konsistent. Es scheint so, als ob Kinder nach einem Computertraining Verbesserungen in ihrer mentalen Rotationsfähigkeit zeigen. In diesen Studien werden mentale Prozesse wie die Transformation und Manipulation visuell-räumlicher Stimuli externalisiert, indem sie auf dem Computermonitor veranschaulicht werden, wie es auch beim hier entwickelten manuellen Rotationstraining der Fall war. Durch die Visualisierung kann bei Kindern anscheinend eine Verbesserung in mentalen Aufgaben erzielt werden. Während diese Studien jedoch mehrstündige Trainingsphasen beinhalteten, konnte mit dem hier verwendeten Training schon nach einer knappen halben Stunde die Leistung in einem mentalen Rotationstest verbessert werden.

Souvignier (2000) stellte in Bezug auf die Förderung räumlicher Fähigkeiten fest, dass gerade bei Kindern und Jugendlichen ein übendes Training durch ein Strategietraining ergänzt werden sollte. Dadurch würden räumliche Fähigkeiten über den Charakter einer Lernvoraussetzung (im Sinne einer passiven Ressource) hinaus in

den Status eines aktiv einsetzbaren „kognitiven Werkzeugs“ versetzt. Während ein extensives mentales Rotationstraining ein rein übendes Training darstellt, kann angenommen werden, dass in einem manuellen Training wie dem hier durchgeführten zusätzlich eine Strategie erlernt wird. Durch den Visualisierungsprozess der Rotation wird dem Kind vor Augen geführt, wie die internale Rotation ausgeführt werden kann. Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass durch die Visualisierung der Rotation, bei der sich der Stimulus als Ganzes dreht, eine holistische Strategie induziert wird. Corballis (1997) ging davon aus, dass Versuchspersonen mit guten mentalen Rotationsfähigkeiten Stimuli holistisch verarbeiten, was eher durch die Aktivierung der rechten Gehirnhälfte geschehen sollte. Schlechte mentale Rotierer benutzen demnach eine analytische Strategie, die eher zu einer linkslateralen Aktivierung führen sollte. Das würde implizieren, dass jüngere Kinder mental zu rotierende Stimuli analytisch verarbeiten. Mit zunehmendem Alter sollten Kinder aufgrund zunehmender Erfahrung eher ganzheitlich mental rotieren. Nach dieser Theorie würden Kinder insbesondere von einem manuellen Rotationstraining profitieren, durch welches eine holistische Verarbeitung induziert wird. Indirekte Unterstützung für einen Wechsel der Strategie mit zunehmendem Alter stammt von Heil und Jansen-Osmann (2006a; 2006b) und Lange (2006). In diesen Studien konnte gezeigt werden, dass die Winkeldisparität einen systematischen Einfluss auf die Negativität ereigniskorrelierter Potentiale hat und dass es bei jüngeren Kindern während der Bearbeitung mentaler Rotationen zu einer linkslateralen Aktivierung kommt, die mit zunehmendem Alter abnimmt (gemessen an parietalen Elektroden).

Die Tatsache, dass das manuelle Training bei Kindern den Prozess der mentalen Rotation an sich trainiert, unterstreicht die Effektivität des Trainings. Vor allem in Hinblick auf Kinder mit Schwierigkeiten im räumlich-kognitiven Bereich ergeben sich hiermit wirkungsvolle Möglichkeiten zur Kompensation dieser Defizite.

6.4.2 Wirkungskomponenten des Trainings

Die hier durchgeführten Experimente zeigen, dass ein manuelles Training die mentale Rotationsfähigkeit verbessern kann. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann jedoch

keine Aussage gemacht werden, auf welche Weise das Training genau wirkt. Bisher wurde auf zwei potentielle Wirkungskomponenten näher eingegangen, die manuell-motorische und die visuelle. Die Beteiligung von manuell-motorischen Prozessen bei der mentalen Rotation wurde ausführlich beschrieben (siehe Abschnitt 1.2.4) und scheint aufgrund enger Zusammenhänge des manuellen Trainings und des computerbasierten mentalen Rotationstests auch in den hier durchgeführten Experimenten eine wichtige Rolle zu spielen. Studien im Erwachsenen- und im Kinderbereich (z.B. Frick et al., 2005; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998) zeigen, dass die gleichzeitige Ausführung einer manuellen Rotation mit der Bearbeitung mentaler Rotationsaufgaben interferiert. In diesem Zusammenhang sind auch die Befunde von Wraga et al. (2003) zu nennen, die implizieren, dass erlernte motorische Strategien auf eine mentale Rotationsaufgabe transferiert werden können. Hinweise, dass die Visualisierung der Rotation ausschlaggebend für Trainingseffekte sein könnte, ergeben sich vor allem aus Trainingsstudien mit Computerspielen (z.B. McClurg & Chaillé, 1987; Souvignier, 2000) und aus Studien, die den Einfluss perzeptueller Prozesse bei der mentalen Rotation zeigen (z.B. Heil et al., 1997). Meiner Meinung nach ist die Visualisierung vor allem bei Kindern von Bedeutung, da sie den Prozess der Rotation nachvollziehbar macht. Durch die Veranschaulichung des Rotationsprozesses und der ganzheitlichen Rotation der Stimuli könnte zudem eine holistische Verarbeitungsstrategie induziert worden sein.

Des Weiteren könnte eine dritte Komponente beteiligt sein, nämlich eine mentale: Wie oben schon kurz angedeutet, ist es vorstellbar, dass Versuchspersonen im manuellen Training vor Beginn jeder manuellen Rotation eine mentale Rotation ausführen, um die Richtung zu bestimmen, in die der Stimulus gedreht werden muss. Bei der oben beschriebenen Zeitmessung der einzelnen Komponenten der manuellen Rotation könnte untersucht werden, ob Versuchspersonen tatsächlich eine mentale Rotation vor Beginn der manuellen Drehung ausführen. Auch wenn es unwahrscheinlich ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Versuchspersonen allein durch diese mentale Wirkungskomponente profitierten und ein manuelles Training somit nicht effektiver wäre als ein mentales Rotationstraining.

An dieser Stelle muss noch einmal betont werden, dass es das Ziel dieser Arbeit war, ein manuelles Training der mentalen Rotation zu entwickeln und zu evaluieren. Es konnte gezeigt werden, dass das manuelle Training die mentale Rotationsfähigkeit verbessert und dabei – zumindest bei Kindern – den mentalen Rotationsprozess an sich trainiert. Zur Analyse der Wirkungskomponenten des manuellen Trainings müssen weitere Studien durchgeführt werden. Eine vergleichende Studie, die sich unmittelbar an die hier durchgeführten Experimente anschließen würde, sollte die Wirkungskomponenten getrennt voneinander untersuchen. Vorstellbar wäre eine Trainingsstudie mit fünf Versuchsgruppen: Neben den beiden in den Experimenten 2 und 3 verwendeten Bedingungen sollten eine rein manuell-motorische, eine rein visuelle und eine mentale Rotationsbedingung erhoben werden. Grundlage der neu hinzugefügten Bedingungen wäre das hier verwendete Training. In der manuell-motorischen Bedingung würden die Stimuli trotz manueller Joystickrotationen stationär bleiben. In der rein visuellen Bedingung würde der Joystick nicht benutzt werden; der Vergleichsstimulus würde sich automatisch drehen und die Versuchsperson müsste reagieren, wenn dieser die räumliche Lage des Standardstimulus erreicht hätte. In der mentalen Rotationsbedingung würde eine mentale Rotationsaufgabe mit den hier im Training verwendeten Stimuli durchgeführt werden. Mittels einer solchen Studie ließe sich klären, ob die kritische Komponente des manuellen Rotationstrainings die visuelle, die manuell-motorische, die Kombination der beiden oder die mentale Komponente ist.

6.4.3 Differentielle Trainingseffekte

Zur Analyse differentieller Trainingseffekte wurden die Versuchspersonen aufgrund ihrer mentalen Rotationsleistung im Prätest eingeteilt in gute und schlechte mentale Rotierer. Des Weiteren wurden geschlechtsspezifische Effekte untersucht.

6.4.3.1 Einfluss der mentalen Rotationsfähigkeit auf die Trainingseffekte

Prinzipiell gibt es im Bereich der kognitiven Trainingsforschung zwei gegensätzliche Ansätze differentieller Effekte (Klauer, 2001). Der erste Ansatz geht davon aus, dass schwächere mentale Rotierer mehr als stärkere von einem Training profitieren, da sie

Lücken kompensieren (siehe z.B. Rizzo et al., 2001; Sacuzzo et al., 1996). Der „Matthäus-Effekt“ besagt dagegen, dass Gute durch ein Training noch besser werden. Größere Trainingseffekte bei besseren Kindern fand zum Beispiel Souvignier (1999). Aufgrund der Untersuchung von Rizzo et al. (2001), die ein manuelles Rotationstraining in einer virtuellen Realität durchführten und dabei Trainingseffekte ausschließlich für Versuchspersonen mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit fanden, war angenommen worden, dass schlechte mentale Rotierer stärker vom hier verwendeten Training profitieren könnten als gute Rotierer.

Sowohl in Experiment 2 als auch in Experiment 3 verbesserten sich schlechte mentale Rotierer in einem höheren Maße als gute mentale Rotierer. Dieser Effekt zeigte sich jedoch nicht in Abhängigkeit der Intervention, was bedeutet, dass innerhalb der Gruppe der schlechten mentalen Rotierer sowohl Versuchspersonen aus der Experimental- als auch aus der Kontrollgruppe profitierten. Die Wiederholung der mentalen Rotationsaufgabe hatte demnach einen Effekt auf die Reaktionszeiten. Sowohl Erwachsene als auch Kinder arbeiteten sich in die Anforderungen der Aufgabe ein und reagierten im Posttest schneller als im Prätest. Die Ergebnisse entsprechen Studien, die ein mentales Rotationstraining verwendeten, in denen gute mentale Rotierer genauso von einem mentalen Rotationstraining profitierten wie schlechte Rotierer (Leone et al., 1993; Lohman & Nichols, 1990).

Deskriptiv lässt sich jedoch feststellen, dass sowohl in Experiment 2 als auch in Experiment 3 die Trainingsgewinne der schlechten mentalen Rotierer in der Trainingsgruppe höher waren als in der Kontrollgruppe und zudem innerhalb der Trainingsgruppe schlechte Rotierer mehr vom Training profitierten als gute. Diese Unterschiede zeigten sich vor allem – wenn auch nicht signifikant – für größere Winkeldisparitäten. So waren zum Beispiel in Experiment 3 Kinder mit schlechter mentaler Rotationsfähigkeit in der größten Winkeldisparität nach dem Training um etwa 1000 ms schneller und nach dem Computerquiz nur um etwa 500 ms. Gute mentale Rotierer dagegen verbesserten sich um knapp über 200 ms nach dem Training und um knapp über 100 ms nach dem Computerquiz. Aus diesem Grunde war unter anderem angenommen worden, dass Kinder mit Spina bifida, die über stark einge-

schränkte räumliche Fähigkeiten verfügen, sich besonders durch das manuelle Training verbessern könnten.

6.4.3.2 Einfluss des Geschlechts auf die Trainingseffekte

Wie erwartet, wurden keine geschlechtsabhängigen Trainingseffekte gefunden. Weder in Experiment 2 noch in Experiment 3 unterschieden sich die Differenzwerte für Reaktionszeiten oder für Fehlerraten zwischen männlichen und weiblichen Versuchspersonen. Auch Baenninger und Newcombe (1989) fanden in ihrer Metaanalyse zur Effektivität räumlichen Trainings allenfalls deskriptiv größere Trainingseffekte für Frauen als für Männer. Sie waren davon ausgegangen, dass die bessere Leistung von Männern in räumlichen Tests vor allem auf die Sozialisation zurückzuführen ist: Jungen dürfen früher die Umwelt selbst erfahren als Mädchen, sie spielen mehr mit geometrischem Spielzeug und üben häufiger Sportarten und Freizeitaktivitäten aus, in denen sie Raumerfahrungen sammeln können. Frauen sollten durch ein räumliches Training diese Defizite kompensieren können und deshalb in höherem Maße profitieren als Männer. Sacuzzo et al. (1996) zeigten, dass ein räumliches Training geschlechtsspezifisch wirken kann, wobei das Testmaterial eine Rolle zu spielen scheint. Die Versuchspersonen führten jeweils zwei Blöcke eines Papier- und Bleistift-Tests der mentalen Rotation sowie eines computerisierten mentalen Rotations-tests mit zweidimensionalen Stimuli durch. Männer schnitten in beiden Tests besser ab als Frauen. Beide Gruppen verbesserten sich zwar von Block zu Block, Frauen und Männer unterschieden sich jedoch im zweiten Block des computerisierten Tests nicht mehr voneinander. Frauen verbesserten sich demnach in diesem Test so stark, dass sie letztlich die gleiche Leistung zeigten wie Männer. In der Papier- und Bleistift-Version dagegen büßten Männer ihren Leistungsvorsprung nicht ein. Auch in der Studie von Rizzo et al. (2001) unterschieden sich die Leistungen von Männern und Frauen im MRT. Nach dem manuellen Training erreichten Frauen jedoch gleich hohe MRT-Werte wie Männer. Während geschlechtsspezifische Effekte wahrscheinlich auf unterschiedlichen Ausgangsleistungen von Männern und Frauen beruhten, war in der hier präsentierten Arbeit die mentale Rotationsfähigkeit vor dem Training von Frauen und Männern gleich gut (Experiment 2). In Experiment 3 schnitten Mädchen

im Prätest zwar schlechter als Jungen ab, konnten aber durch das Training nicht in stärkerem Maße profitieren. Mir ist keine Studie im Kinderbereich bekannt, in der geschlechtsspezifische Trainingseffekte gezeigt werden konnten.

6.5 Anwendung des Trainings mit Spina bifida-Kindern

Im Folgenden wird die Anwendung des manuellen Trainings mit Spina bifida-Kindern diskutiert. Aufgrund der schweren Beeinträchtigungen dieser Kinder im räumlich-kognitiven Bereich war angenommen worden, dass sie besonders von einem solchen Training, das den Rotationsprozess an sich verbessert, profitieren würden.

6.5.1 Mentale Rotationsfähigkeit der Spina bifida-Kinder

Erstmals überhaupt wurde mittels eines chronometrischen Tests die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida getestet. Die Ergebnisse belegen, dass diese Kinder die Aufgaben des computerbasierten mentalen Rotationstests mittels mentaler Rotation lösten. Die Annahme, dass Kinder mit Spina bifida im Vergleich zu einer nach Alter, Geschlecht und Verbal-IQ zugeordneten Kontrollgruppe beeinträchtigte mentale Rotationsfähigkeiten zeigen, konnte bestätigt werden: Spina bifida-Kinder waren deutlich langsamer und machten zudem mehr Fehler. Auch in der Steigung der Regressionsgeraden zeigten sich deutliche Unterschiede. Kinder mit Spina bifida zeigten höhere Werte und waren demnach im mentalen Rotationsprozess an sich beeinträchtigt. Da die Gruppen sich schon in der kleinsten Winkeldisparität deutlich in den Reaktionszeiten unterschieden, kann davon ausgegangen werden, dass die Kinder mit Spina bifida auch in den anderen beteiligten Prozessen (siehe Cooper & Shepard, 1973) verlangsamt waren. Die Spina bifida-Gruppe rotierte mit einer mentalen Rotationsgeschwindigkeit von $78.6^\circ/s$ und war damit deutlich langsamer als die Kontrollgruppe ($127.2^\circ/s$), deren Geschwindigkeit im Bereich der in Experiment 3 gefundenen lag. Kinder mit Spina bifida scheinen demnach – zumindest in Bezug auf die mentale Rotation – über eine verlangsamte kognitive Ver-

arbeitungsgeschwindigkeit zu verfügen. Außerdem arbeiteten sie fehlerhaft: Sie machten deutlich mehr Fehler und drei Kinder mit Spina bifida mussten aufgrund einer Fehlerrate über 40% von der Datenanalyse ausgeschlossen werden.

Die schlechtere Leistung der Kinder mit Spina bifida spiegelt Befunde aus vorherigen Studien mit kognitiv und körperlich beeinträchtigten Kindern wider. So verglich zum Beispiel Snow (1990) eine Gruppe achtjähriger Kinder mit einer Gruppe gleichaltriger lernbeeinträchtigter Kinder. Die lernbeeinträchtigten Kinder schnitten sowohl in einer Buchstaben- als auch in einer Objektversion eines mentalen Rotations-tests schlechter ab. In einem weiteren Experiment konnte zudem eine schlechtere Leistung einer Gruppe von Kindern mit Aufmerksamkeitsdefizitstörung und einer neurologisch erkrankten Gruppe im Vergleich zu gesunden Kindern gezeigt werden. Knapp die Hälfte der teilnehmenden älteren Jugendlichen mit geistiger Entwicklungsstörung war in einer anderen Studie nicht in der Lage, aufrecht stehende zweidimensionale Objekte als „identisch“ oder „gespiegelt“ zu klassifizieren (Borys, 1980). Im Bereich der körperlichen Beeinträchtigungen zeigten Rovet und Netley (1980), dass Jugendliche mit dem Ullrich-Turner Syndrom eine deutlich langsamere mentale Rotationsgeschwindigkeit aufweisen als gesunde Jugendliche. Auch Kinder mit Down Syndrom scheinen große Schwierigkeiten mit mentalen Rotationsaufgaben zu haben: Während für gesunde und lernbehinderte Kinder eine ansteigende mentale Rotationsfunktion gefunden wurde, war das für die Kinder mit Down Syndrom nicht der Fall (Uecker, Obrzut & Nadel, 1994).

In der hier durchgeführten Studie konnten in Bezug auf die vorangegangene räumlich-kognitive Testung Zusammenhänge zur mentalen Rotationsfähigkeit aufgezeigt werden. Die Aufgabe zur räumlichen Visualisierung (nach Linn & Petersen, 1985) korrelierte mit der mentalen Rotationsfähigkeit. Linn und Petersen extrahierten die drei Faktoren der räumlichen Fähigkeiten nicht aufgrund faktorenanalytischer Verfahren, sondern aufgrund der kognitiven Anforderungen. Sie postulierten demnach nicht unbedingt die Unabhängigkeit dieser Faktoren. Der Papier- und Bleistift-Test der mentalen Rotation wies keinerlei Beziehungen zur Leistung im computerbasierten mentalen Rotationstest auf, was den Ergebnissen in Experiment 3 entspricht. Das

scheint meiner Meinung nach auf zwei Gründen zu beruhen: Erstens ist der Papier- und Bleistift-Test mit seinen acht Items wenig reliabel (siehe Abschnitt 6.1) und zweitens gibt es diverse Unterschiede zwischen psychometrischen und chronometrischen Tests der mentalen Rotation (wie z.B. Gesamtpunktwert vs. Reaktionszeit- und Fehlermessung) und daraus resultierende unterschiedliche Ergebnisse. Es zeigten sich Zusammenhänge zwischen der mentalen Rotationsfähigkeit und den räumlichen Fähigkeiten in einem virtuellen Umgebungsraum. Kinder mit besserer mentaler Rotationsfähigkeit brauchten weniger Durchgänge, um einen Weg in einem virtuellen Labyrinth zu lernen, machten weniger Fehler im Testdurchgang und konnten mehr Landmarken abrufen. Diese Korrelationen bewegten sich im Bereich zwischen $r = .35$ und $.47$ und waren damit deutlich höher als die von Hegarty und Waller (2005) beschriebenen.

6.5.2 Manuelle Rotationsfähigkeit der Spina bifida-Kinder

Wie in den Experimenten zuvor wurden Parallelen zwischen der mentalen und der manuellen Rotation gefunden. Ein Anstieg der Winkeldisparität führte zu einer Zunahme der Rotationszeiten und der Fehlerraten in beiden Aufgaben. Vergleichbar mit den Ergebnissen in der mentalen Aufgabe waren die Kinder mit Spina bifida in der manuellen Rotation langsamer als die gesunden Vergleichskinder. Die Rotationszeitdifferenzen beruhten jedoch nicht auf unterschiedlichen manuellen Rotationsgeschwindigkeiten: Die Verlangsamung der Kinder mit Spina bifida im Vergleich zur Kontrollgruppe blieb bei steigender Winkeldisparität konstant. Demnach scheinen die langsameren Rotationszeiten nicht auf motorischen Schwierigkeiten bei der Joystickdrehung zu beruhen, sondern auf anderen Prozessen, wie der Enkodierung oder dem Vergleich der Stimuli. Auffällig ist, dass die Kinder mit Spina bifida längere Distanzen in die richtige Richtung drehten als die gesunden Kinder, sie also bei der Wahl der Rotationsrichtung eine bessere Leistung zeigten als die Kontrollgruppe. Es scheint demnach plausibel, dass die höheren Rotationszeiten der Spina bifida-Kinder auf einer längeren Zeitdauer des Vergleichsprozesses beruhen: Sie vergleichen genauer, in welche Richtung der Stimulus gedreht werden muss, während die gesunden Kinder eher unüberlegt in eine der beiden Richtungen drehen.

Zusätzliche Belege für den engen Zusammenhang zwischen mentaler und manueller Rotation ergab die Berechnung der Korrelationen: Die Reaktionszeiten in der mentalen Aufgabe korrelierten signifikant mit den manuellen Rotationszeiten. Die Korrelationen unterschieden sich dabei nicht zwischen der Spina bifida- und der Kontrollgruppe. Die Leistung in der mentalen und der manuellen Rotationsaufgabe korrelierte jedoch deskriptiv höher für die Kinder mit Spina bifida. Mentale und manuelle Prozesse könnten bei Kindern mit Spina bifida demnach enger gekoppelt sein als bei gesunden Kindern. Da jüngere Kinder größere Probleme haben, mentale und motorische Prozesse zu entkoppeln (Frick et al., 2005), könnte angenommen werden, dass die Beziehung zwischen mentaler und manueller Rotation enger bei kognitiv geringer entwickelten Kindern ist und diese Kinder folglich besonders von einem manuellen Training profitieren.

6.5.3 Effekte des manuellen Rotationstrainings bei Kindern mit Spina bifida

Aufgrund der erfolgreichen Evaluation des manuellen Trainings und der relativ kleinen Stichprobe der Spina bifida-Kinder wurde auf eine Nicht-Trainingsgruppe verzichtet. Vielmehr führten sowohl die Kinder mit Spina bifida als auch die gesunden Kinder das manuelle Training durch. Beide Gruppen zeigten niedrigere Reaktionszeiten im Posttest als im Prätest der mentalen Rotation. Die Differenzwerte zwischen Prä- und Posttest der Kinder mit Spina bifida waren fast zweimal so hoch wie die der gesunden Kinder und verdeutlichen eine drastische Verringerung der Reaktionszeiten. Somit kann die Hypothese bestätigt werden, dass Kinder mit Spina bifida in deutlich höherem Maße vom manuellen Rotationstraining profitieren als gesunde.

Es könnte eingewendet werden, dass die Kinder mit Spina bifida durch die höheren Rotationszeiten im manuellen Training länger mit dieser Aufgabe beschäftigt waren. Dagegen spricht jedoch eindeutig der positive Zusammenhang zwischen der manuellen Rotationszeit und der Reaktionszeit im Posttest für die Kinder mit Spina bifida: Kinder, die in der manuellen Rotation länger brauchten, zeigten auch längere Reaktionszeiten im Posttest der mentalen Rotation.

Einen Beleg für die Verbesserung der mentalen Rotationsleistung der Kinder mit Spina bifida findet sich auch in den Steigungen der Regressionsgeraden. Während sich im Prätest die beiden Gruppen in der mentalen Rotationsgeschwindigkeit unterschieden, erreichten die Kinder mit Spina bifida im Posttest die gleiche Geschwindigkeit wie die gesunden Kinder. Demnach scheinen sich die Kinder mit Spina bifida tatsächlich im mentalen Rotationsprozess an sich verbessert zu haben und nicht in anderen Prozessen wie der Enkodierung oder dem Vergleich der Stimuli. Unterstützt wird diese Annahme auch durch die getrennte Analyse von „alten“, im Training gelernten und „neuen“ Stimuli: Der Trainingseffekt beschränkte sich nicht auf vorher gelernte Objekte.

Die Kinder mit Spina bifida profitierten jedoch nicht nur in höherem Maße in Bezug auf die Reaktionszeiten, sondern auch auf die Fehlerraten. Dieser Befund unterstreicht die Wirksamkeit des hier durchgeführten Trainings für beeinträchtigte Kinder. In keinem der zuvor berichteten Experimente ließ sich ein Trainingseffekt auf die Fehlerrate finden. Kinder mit Spina bifida arbeiteten deutlich fehlerfreier im Posttest, was insbesondere an der Visualisierung des Rotationsprozesses im Training liegen könnte. Die visuelle Komponente des Trainings und damit die Nachvollziehbarkeit des Rotationsprozesses könnte vor allem bei Kindern mit großen Beeinträchtigungen im visuell-räumlichen Bereich eine große Rolle spielen. Dass auch Kinder, die nicht in der Lage sind, mental zu rotieren, vom manuellen Training profitieren können, legt ein Blick auf die Daten der Kinder nahe, die wegen einer zu hohen Fehlerrate im Prätest von der Datenanalyse ausgeschlossen worden waren. Zwar antwortete eines dieser Kinder sowohl im Prä- als auch im Posttest auf Zufallsniveau, die anderen beiden Kinder verbesserten jedoch ihre Fehlerrate von 50% im Prätest auf 40% beziehungsweise 35% im Posttest.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich zusammenfassen, dass die Anwendung des manuellen Trainings sehr erfolgreich war. Es konnte gezeigt werden, dass die Anwendung eines solchen Trainings die mentale Rotationsfähigkeit – insbesondere von Kindern mit spezifischen Beeinträchtigungen der räumlichen-kognitiven Fähigkeiten – verbessern kann. Damit ist der Weg geebnet für eine weitere Nutzung des

Trainings mit anderen Patientengruppen. Durch die einfache Durchführung an einem Computer und Benutzung eines Joysticks kann das Training zudem nicht nur im Labor (wie zum Beispiel das manuelle Training von A. Rizzo und Kollegen), sondern auch in Schulen, Kliniken oder zu Hause angewendet werden.

6.6 Kritische Anmerkungen

Wie bei vielen experimentellen Studien müssen auch zu den hier durchgeführten Experimenten einige kritische Anmerkungen angeführt werden. Dabei muss vor allem das Untersuchungsdesign und die Analyse der Trainingseffekte angesprochen werden.

6.6.1 Auswahl einer geeigneten Beschäftigung der Kontrollgruppe

Eine Kontrollgruppe ist bei der Evaluation eines kognitiven Trainings notwendig, um unspezifische Wirkungen des Trainings und Retesteffekte zu kontrollieren. Es ist möglich, dass Verbesserungen im Posttest alleinig auf einem Placebo-Effekt oder auf Zuwendungseffekten beruhen (s. z.B. Adair et al., 1990; Willson & Putnam, 1982). So können Trainingseffekte zum Beispiel alleine dadurch zustande kommen, dass die Versuchspersonen der Trainingsgruppe sich hervorgehoben fühlen und demnach motivierter sind als eine nicht trainierende Kontrollgruppe. In den hier präsentierten Experimenten 2 und 3 wurde daher zusätzlich zur Trainingsgruppe eine Kontrollgruppe im gleichen experimentellen Setting untersucht. Um die Bedingungen möglichst konstant zu halten, wurden jeweils zwei Versuchspersonen gleichzeitig getestet, wobei eine der Experimental- und eine der Kontrollgruppe zugeordnet wurden. Zur Beschäftigung der Kontrollgruppe wurde eine Aufgabe verwendet, in der unspezifisch interveniert wurde. Gewählt wurde ein Computerquiz, das keinerlei räumliche Anforderungen enthielt. Es sollte die Versuchspersonen im gleichen Maße wie das Training fordern, um auszuschließen, dass die Kontrollgruppe ausgeruhter und konzentrierter den Posttest bearbeitete als die Experimentalgruppe. Trotz eines hohen Grads an Parallelisierung zwischen den Aufgaben der Gruppen kann nicht

ausgeschlossen werden, dass die Trainingseffekte auf anderen, nicht berücksichtigten Unterschieden zwischen der Experimental- und der Kontrollgruppe beruhen.

In Experiment 4 wurde aufgrund der zu kleinen Gruppe an Spina bifida-Kindern keine Kontrollgruppe erhoben, die das manuelle Training nicht durchführte. Auch wenn die Kinder mit Spina bifida im Posttest der mentalen Rotation deutlich besser waren als im Prätest, kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch die bloße Testwiederholung zu denselben Ergebnissen geführt hätte. Auch wenn dies – vor allem aufgrund der Ergebnisse in Experiment 3 – unwahrscheinlich erscheint, sollte ein weiteres Trainingsexperiment mit einer Gruppe von Spina bifida-Kindern, die das Computerquiz spielt, angeschlossen werden.

6.6.2 Verwendung von Differenzwerten

Die Verwendung von Differenzwerten muss generell kritisch betrachtet werden. Es kann zur Kumulation von Messfehlern aus Prä- und Posttest kommen und eine Regression zur Mitte kann nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der Kumulation der Messfehler werden Differenzwerte häufig als unreliabel angesehen, was vor allem dann der Fall zu sein scheint, wenn die Werte der Prä- und Posttestung hoch miteinander korrelieren. Zu einer Regression zur Mitte kommt es dadurch, dass extreme Prätestwerte im Posttest zu mittleren streben, ohne dabei reale Veränderungen abzubilden. Das Problem der Regression zur Mitte besteht vor allem bei der Überprüfung differentieller Trainingseffekte, wenn Versuchspersonen auf Basis ihrer Werte im Prätest – zum Beispiel in Abhängigkeit der mentalen Rotationsfähigkeit – einer bestimmten Gruppe zugeordnet werden. Dasselbe Problem betrifft natürlich auch die (quasi-experimentelle) Gruppeneinteilung in Experiment 4. Souvignier (2000) schreibt deshalb (S. 88): „Die Analyse differentieller Leistungsveränderungen stellt eine sinnvolle Ergänzung bei der Evaluation von Trainingsprogrammen dar – auch wenn sie nicht den Rang einer strengen Hypothesenprüfung einnimmt“.

Trotz dieser Schwierigkeiten wurden in den hier durchgeführten Experimenten Differenzwerte analysiert, was auf folgenden Feststellungen begründet ist: Erstens konnte gezeigt werden, dass beide kritischen Punkte – Kumulation von Messfehlern

und Regression zur Mitte – nicht auftreten, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Trainingseffekte auf „wahren“ Veränderungen beruhen (Rogosa, Brandt & Zimowski, 1982). Zweitens fasst Souvignier (2000) zusammen, dass bei der Messung von Trainingseffekten der Vergleich zwischen der Experimental- und der Kontrollgruppe mittels Differenzwerten zwischen Prä- und Posttest die adäquate Methode darstellt.

6.6.3 Bedeutung der Trainingseffekte

In Bezug auf Experiment 4 kann nicht ausgeschlossen werden, dass die gefundenen Unterschiede zwischen der Spina bifida- und der Kontrollgruppe in den Differenzwerten auf Deckeneffekten beruhen. Die Kontrollgruppe konnte sich aufgrund ihrer besseren Ausgangsleistung vielleicht gar nicht in gleichem Maße wie die Kinder mit Spina bifida verbessern.

Des Weiteren stellt sich die Frage nach den Langzeiteffekten des durchgeführten Trainings. Der Posttest der mentalen Rotation wurde direkt im Anschluss an das Training erhoben. Es wurden demnach nur kurzzeitige Veränderungen erfasst. Über die Wirksamkeit des Trainings über eine größere Zeitdauer als die hier getestete kann keine Aussage gemacht werden.

6.7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden ein computerbasierter mentaler Rotationstest und ein manuelles Training der mentalen Rotation entwickelt. Nach der erfolgreichen Validierung wurde der computerbasierte mentale Rotationstest eingesetzt, um Trainingseffekte abzubilden. Sowohl Erwachsene als auch Kinder profitierten vom manuellen Training. Während bei Erwachsenen der Trainingseffekt jedoch auf Stimuli beschränkt war, die vorher im Training gelernt wurden, war dies bei Kindern nicht der Fall. Das manuelle Training wirkt demnach bei Kindern auf den Rotationsprozess an sich. Die mentale Rotation wird demnach nicht durch einen bloßen Abruf von Gedächtnisrepräsentationen ersetzt, was ein bedeutender Vorteil gegenüber mentalen Trainingsprogrammen (z.B. Kail & Park, 1990) ist.

Erstmalig wurde die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern mit Spina bifida umfassend untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese Kinder sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Genauigkeit bei der Bearbeitung der mentalen Rotationsaufgabe beeinträchtigt sind. Im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe profitierten die Spina bifida-Kinder in weit höherem Maße vom manuellen Training.

Das hier entwickelte manuelle Training scheint demnach insbesondere für Kinder ein viel versprechendes Programm zur Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit zu sein. In weiteren Studien sollten neben der Langzeitwirkung sowohl der Anwendungsbezug als auch die theoretische Grundlage der beteiligten Wirkungskomponenten (siehe Abschnitt 6.4.2) untersucht werden. In Bezug auf Langzeiteffekte ist anzunehmen, dass es sich eher um Effekte handelt, die schnell wieder verblassen, falls es bei einer einmaligen Anwendung des Trainings bleibt. Es gibt jedoch auch Studien, die zeigen, dass ein Training eher wie ein Anschub wirkt und der Trainingseffekt mit der Zeit sogar noch zunehmen kann (für eine Übersicht s. Klauer, 2001). Um den Anwendungsbezug auch bei anderen Versuchsgruppen zu demonstrieren, sollten die bereits gewonnenen Trainingsergebnisse zusätzlich auf unterschiedliche Stichproben erweitert werden. So könnte in einem Folgeexperiment die Wirksamkeit des computerbasierten manuellen Rotationstrainings für Kinder mit schlechten Mathematikleistungen oder mit einer Dyslexie untersucht werden. Burnett, Lane und Dratt (1979) konnten einen Zusammenhang zwischen der Fähigkeit der mentalen Rotation und der Leistung in einem mathematischen *College-Entrance-Test* zeigen. Der mathematische Test enthielt dabei neben Aufgaben zur Geometrie auch Aufgaben zur Arithmetik und zur Algebra. Die Leistung in der mentalen Rotationsaufgabe konnte sogar die Geschlechtsunterschiede im mathematischen Test aufklären. Eine ähnliche Studie wurde von Casey, Nuttall und Pezaris (1997) mit Schülern, die gute Testergebnisse im Mathematiktest erzielten, durchgeführt. Auch hier korrelierte der MRT hoch mit dem Mathematiktest und schien ausschlaggebend für die Geschlechtsunterschiede im Mathematiktest zu sein. Kinder mit Lese-Rechtschreib-Schwäche verfügen über beeinträchtigte mentale Rotationsfähigkeiten (Karádi, Kovács, Szepesi, Szabó & Kállai, 2001; Rüsseler, Scholz, Jordan & Quaiser-Pohl, 2005). Die Beeinträchtigungen scheinen dabei unabhängig davon zu sein, ob

Bilder, Buchstaben oder Würfelfiguren rotiert werden müssen. Die mentale Rotationsfähigkeit von Bildern erwies sich als bester Prädiktor der Lese-Rechtschreibschwäche (Rüsseler et al., 2005). Es kann angenommen, dass Kinder mit großen Schwierigkeiten in Mathematik oder mit einer Dyslexie von einem manuellen Rotationstraining stark profitieren können. Sehr gewagt – aber umso interessanter – wäre die Annahme, dass ein solches Training wiederum positiv auf Mathematik- oder Lese-Rechtschreibfähigkeiten wirkt. Eher anzunehmen ist die Generalisierbarkeit des manuellen Trainings auf andere räumliche Fähigkeiten.

Das hier entwickelte Training stellt ein Programm dar, das sich in Schulen, Kliniken und Privathaushalten einsetzen lässt. Es ist in seiner Handhabung einfach und erfordert nur einen Computer und einen Joystick. Im Gegensatz dazu verwendeten Rizzo et al. (2001) in ihrer Trainingsstudie eine Großleinwand und spezielle Eingabegeräte. Sie hofften darauf, dass in Zukunft „our scenario could be delivered on less expensive and readily available equipment“ (S. 98). Das manuelle Rotationstraining könnte somit ein Instrument zur Verbesserung der mentalen Rotationsfähigkeit werden, das bei gesunden Kindern und insbesondere bei Kindern mit spezifischen Schwierigkeiten im räumlich-kognitiven Bereich angewendet wird. Das Potential des Trainings wird vor allem dadurch deutlich, dass es den mentalen Rotationsprozess an sich verbessert und nicht auf Gedächtnisprozessen beruht. Die Experimente dieser Arbeit stellen jedoch nur den Anfang der Evaluation dieses Trainingsprogramms dar; weiterführende Studien müssen folgen.

7 Literatur

- Adair, J. G., Sharpe, D. & Huynh, C. L. (1990). The placebo control group: An analysis of its effectiveness in educational research. *Journal of Experimental Education*, 59, 67-86.
- Baenninger, M. & Newcombe, N. (1989). The role of experience in spatial test performance: A meta-analysis. *Sex Roles*, 20, 327-344.
- Barnes, J., Howard, R. J., Senior, C., Brammer, M., Bullmore, E. T., Simmons, A. et al. (2000). Cortical activity during rotational and linear transformations. *Neuropsychologia*, 38, 1148-1156.
- Berg, C., Hertzog, C. & Hunt, E. (1982). Age differences in the speed of mental rotation. *Developmental Psychology*, 18, 95-107.
- Bethell-Fox, C. E. & Shepard, R. N. (1988). Mental rotation: Effects of stimulus complexity and familiarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 12-23.
- Boles, D. B. (1980). X-linkage of spatial ability: A critical review. *Child Development*, 51, 625-635.
- Booth, J. R., MacWhinney, B., Thulborn, K. R., Sacco, K., Voyvodic, J. T. & Feldman, H. M. (2001). Developmental and lesion effects in brain activation during sentence comprehension and mental rotation. *Developmental Neuropsychology*, 18, 139-169.
- Borys, S. V. (1980). Kinetic-imagery ability of mentally retarded young adults. *American Journal of Mental Deficiency*, 84, 582-588.
- Brookshire, B. L., Fletcher, J. M., Bohan, T. P. & Landry, S. H. (1995). Verbal and non-verbal skill discrepancies in children with hydrocephalus: A five-year longitudinal follow-up. *Journal of Pediatric Psychology*, 20, 785-800.
- Bryden, M. P., George, J. & Inch, R. (1990). Sex differences and the role of figural complexity in determining the rate of mental rotation. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 467-477.
- Burnett, S. A., Lane, D. M. & Dratt, L. M. (1979). Spatial visualization and sex differences in quantitative ability. *Intelligence*, 3, 345-354.

- Casari, E. F. & Fantino, A. G. (1998). A longitudinal study of cognitive abilities and achievement status of children with myelomeningocele and their relationship with clinical types. *European Journal of Pediatric Surgery*, 8, 52-54.
- Casey, M., Nuttall, R. L. & Pezaris, E. (1997). Mediators of gender differences in mathematics college entrance test scores: A comparison of spatial skills with internalized beliefs and anxieties. *Developmental Psychology*, 33, 669-680.
- Casey, M. B. (1996). Gender, sex, and cognition: Considering the interrelationship between biological and environmental factors. *Learning and Individual Differences*, 8, 39-53.
- Cohen, J. (1977). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: Academic Press.
- 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, 89-100.
- Cooper, L. A. (1975). Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive Psychology*, 7, 20-43.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (pp. 75-176). Oxford, England: Academic.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1982). Chronometric studies of the rotation of mental images. In R. N. Shepard & L. A. Cooper (Eds.), *Mental images and their transformation* (pp. 72-121). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Corballis, M. C. (1986). Is mental rotation controlled or automatic? *Memory & Cognition*, 14, 124-128.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 57, 100-121.
- Corballis, M. C. & McLaren, R. (1982). Interaction between perceived and imagined rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 215-224.
- De Lisi, R. & Cammarano, D. M. (1996). Computer experience and gender differences in undergraduate mental rotation performance. *Computers in Human Behavior*, 12, 351-361.

- Dennis, M., Fletcher, J. M., Rogers, T., Hetherington, R. & Francis, D. J. (2002). Object-based and action-based visual perception in children with spina bifida and hydrocephalus. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, 95-106.
- Doll, B. (1998). Orthopädie. In T. Michael, A. von Moers & A. E. Strehl (Eds.), *Spina bifida: Interdisziplinäre Diagnostik, Therapie und Beratung* (pp. 196-204). Berlin: de Gruyter.
- Dror, I. E., Kosslyn, S. M. & Waag, W. L. (1993). Visual-spatial abilities of pilots. *Journal of Applied Psychology*, 78, 763-773.
- Ekstrom, R. B., French, J. W., Harman, H. H. & Dermen, D. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests*. Princeton: Educational Testing Service.
- Eme, P. E. & Marquer, J. (1999). Individual strategies in a spatial task and how they relate to aptitudes. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 89-108.
- Estes, D. (1998). Young children's awareness of their mental activity: The case of mental rotation. *Child Development*, 69, 1345-1360.
- Fiorio, M., Tinazzi, M. und Aglioti, S. M. (2005). Selective impairment of hand mental rotation in patients with focal hand dystonia. *Brain Advance Access*, 1-7.
- Foreman, N., Stanton, D., Wilson, P. & Duffy, H. (2003). Spatial knowledge of a real school environment acquired from virtual or physical models by able-bodied children and children with physical disabilities. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9, 67-74.
- Frick, A., Daum, M. M., Walser, S. & Mast, F. W. (2005). Developmental changes in the interference of motor processes with mental rotation. In B. G. Bara, L. Barsalou & M. Bucciarelli (Eds.), *Proceedings of the XXVII Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci2005)* (pp. 700-725). Stresa: University of Turin.
- Funk, M., Brugger, P. & Wilkening, F. (2005). Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science*, 8, 402-408.
- Ganis, G., Keenan, J. P., Kosslyn, S. M. & Pascual-Leone, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation. *Cerebral Cortex*, 10, 175-180.
- Ginn, S. R. & Pickens, S. J. (2005). Relationships between spatial activities and scores on the Mental Rotation Test as a function of sex. *Perceptual and Motor Skills*, 100, 877-881.
- Goldstein, D., Haldane, D. & Mitchell, C. (1990). Sex differences in visual-spatial ability: The role of performance factors. *Memory & Cognition*, 18, 546-550.

- Grimshaw, G. M., Sitarenios, G. & Finegan, J. A. K. (1995). Mental rotation at 7 years: Relations with prenatal testosterone levels and spatial play experiences. *Brain and Cognition*, 29, 85-100.
- Hale, S. (1990). A global developmental trend in cognitive processing speed. *Child Development*, 61, 653-663.
- Halliwell, M. D., Carr, J. & Pearson, A. (1980). The intellectual and educational functioning of children with neural tube defects. *Zeitschrift für Kinderchirurgie*, 31, 375-381.
- Halpern, D. F. (1986). A different answer to the question, "Do sex-related differences in spatial abilities exist?" *American Psychologist*, 41, 1014-1015.
- Halpern, D. F. & Tan, U. (2001). Stereotypes and steroids: Using a psychobiosocial model to understand cognitive sex differences. *Brain and Cognition*, 45, 392-414.
- Hegarty, M. & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (pp. 121-169). Cambridge: University Press.
- 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, 681-692.
- Heil, M. & Jansen-Osmann, P. (2006a). *Children's left hemispheric activation during mental rotation is reliable as well as specific*. Manuscript submitted for publication.
- Heil, M. & Jansen-Osmann, P. (2006b). *Developmental aspects of hemispheric asymmetry during mental rotation*. Manuscript submitted for publication.
- Heil, M. & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414-422.
- 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, 99-106.
- Hooven, C. K., Chabris, C. F., Ellison, P. T. & Kosslyn, S. M. (2004). The relationship of male testosterone to components of mental rotation. *Neuropsychologia*, 42, 782-790.
- Jacobi, G., Preisler, B. & Kieslich, M. (1998). Inzidenz und regionale Verteilung. In T. Michael, A. von Moers & A. E. Strehl (Eds.), *Spina bifida: Interdisziplinäre Diagnostik, Therapie und Beratung* (pp. 3-4). Berlin: de Gruyter.

- Jacobs, R., Northam, E. & Anderson, V. (2001). Cognitive outcome in children with myelomeningocele and perinatal hydrocephalus: A longitudinal perspective. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, 13, 389-405.
- Jansen-Osmann, P. & Berendt, B. (2002). Investigating distance knowledge using virtual environments. *Environment & Behavior*, 34, 178-193.
- Jansen-Osmann, P. & Berendt, B. (2005). What makes a route appear longer? An experimental perspective on features, route segmentation, and distance knowledge. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 58A, 1390-1414.
- Jansen-Osmann, P. & Fuchs, P. (in press). Wayfinding behaviour and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of landmarks. *Journal of Experimental Psychology*.
- Jansen-Osmann, P. & Wiedenbauer, G. (2004a). The influence of turns on distance cognition: New experimental approaches to clarify the route-angularity effect. *Environment & Behavior*, 36, 790-813.
- Jansen-Osmann, P. & Wiedenbauer, G. (2004b). The representation of landmarks and routes in children and adults: A study in a virtual environment. *Journal of Environmental Psychology*, 24, 347-357.
- Jansen-Osmann, P. & Wiedenbauer, G. (2004c). Wayfinding performance in and the spatial knowledge of a color-coded building for adults and children. *Spatial Cognition and Computation*, 4, 337-358.
- Jansen-Osmann, P. & Wiedenbauer, G. (2006). Distance cognition in virtual environmental space: Further investigations to clarify the route-angularity effect. *Psychological Research*, 70, 43-51.
- Jansen-Osmann, P., Wiedenbauer, G., Schmid, J. & Heil, M. (2006). *The role of landmarks and structural maps regarding the wayfinding performance and spatial knowledge in adults and children*. Manuscript submitted for publication.
- Jolicoeur, P. & Cavanagh, P. (1992). Mental rotation, physical rotation, and surface media. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 371-384.
- Jordan, K., Wuestenberg, T., Heinze, H. J., Peters, M. & Jaencke, L. (2002). Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, 40, 2397-2408.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8, 441-480.

- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1985). Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability. *Psychological Review*, 92, 137-172.
- Kail, R. (1986). The impact of extended practice on rate of mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 42, 378-391.
- Kail, R. (1988). Developmental functions for speeds of cognitive processes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 45, 339-364.
- Kail, R. & Park, Y. S. (1990). Impact of practice on speed of mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 227-244.
- Kail, R., Pellegrino, J. & Carter, P. (1980). Developmental changes in mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 102-116.
- Karádi, K., Kovács, B., Szepesi, T., Szabó, I. & Kállai, J. (2001). Egocentric mental rotation in hungarian dyslexic children. *Dyslexia*, 7, 3-11.
- Kaufman, A. S. & Kaufman, N. L. (1983). *K-ABC Kaufman Assessment Battery for Children: administration and scoring manual*. Circle Pines: American Guidance Service.
- Kaushall, P. & Parsons, L. M. (1981). Optical information and practice in the discrimination of 3-D mirror-reflected objects. *Perception*, 10, 545-562.
- Kimura, D. & Hampson, E. (1994). Cognitive pattern in men and women is influenced by fluctuations in sex hormones. *Current Directions in Psychological Science*, 3, 57-61.
- Kirby, J. R. & Boulter, D. R. (1999). Spatial ability and transformational geometry. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 283-294.
- Klauer, K. J. (2001). Trainingsforschung: Ansätze - Theorien - Ergebnisse. In K. J. Klauer (Ed.), *Handbuch Kognitives Training* (pp. 3-66). Göttingen: Hogrefe.
- Kosslyn, S. M. (1981). The medium and the message in mental imagery: A theory. *Psychological Review*, 88, 46-66.
- Kosslyn, S. M., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L. & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35, 151-161.
- Kosslyn, S. M., Margolis, J. A., Barrett, A. M. & Goldknopf, E. J. (1990). Age differences in imagery abilities. *Child Development*, 61, 995-1010.

- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Wraga, M. & Alpert, N. M. (2001). Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: Distinct neural mechanisms. *Neuroreport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 12, 2519-2525.
- Kyllonen, P. C., Lohman, D. F. & Snow, R. E. (1984). Effects of aptitudes, strategy training, and task facets on spatial task performance. *Journal of Educational Psychology*, 76, 130-145.
- Lange, L. F. (2006). *Untersuchung der Hemisphärenasymmetrie während mentaler Rotation und Gedächtnissuche bei Kindern*. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf: Diplomarbeit.
- Larson, P., Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Van Rooyen, A., Kratz, K., Neumann, U. et al. (1999). Gender issues in the use of virtual environments. *CyberPsychology & Behavior*, 2, 113-123.
- Leone, G., Taine, M. C. & Droulez, J. (1993). The influence of long-term practice on mental rotation of 3-D objects. *Cognitive Brain Research*, 1, 241-255.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A. & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, 35, 940-949.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.
- Lipsey, M. W. & Wilson, D. B. (1993). The efficacy of psychological, educational, and behavioral treatment: Confirmation from meta-analysis. *American Psychologist*, 48, 1181-1209.
- Lohaus, A., Schuhmann-Hengstler, R. & Kessler, T. (1999). *Räumliches Denken im Kindesalter*. Göttingen: Hogrefe.
- Lohman, D. F. (1979). *Spatial ability: Review and re-analysis of the correlational literature*: Stanford University technical report No. 8.
- Lohman, D. F. & Nichols, P. D. (1990). Training spatial abilities: Effects of practice on rotation and synthesis tasks. *Learning and Individual Differences*, 2, 67-93.
- Lonton, A. P. (1977). Location of the myelomeningocele and its relationship to subsequent physical and intellectual abilities in children with myelomeningocele associated with spina bifida and hydrocephalus. *Zeitschrift für Kinderchirurgie*, 22, 510-519.
- Malinowski, J. C. (2001). Mental rotation and real-world wayfinding. *Perceptual and Motor Skills*, 92, 19-30.

- Mammarella, N., Cornoldi, C. & Donadello, E. (2003). Visual but not spatial working memory deficit in children with spina bifida. *Brain and Cognition*, 53, 311-314.
- Marmor, G. S. (1975). Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? *Cognitive Psychology*, 7, 548-559.
- Marmor, G. S. (1977). Mental rotation and number conservation: Are they related? *Developmental Psychology*, 13, 320-325.
- McClurg, P. A. & Chaillé, C. (1987). Computer games: Environments for developing spatial cognition? *Journal of Educational Computing Research*, 3, 95-111.
- McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86, 889-918.
- Meng, X. I., Rosenthal, R. & Rubin, D. B. (1992). Comparing correlated correlation coefficients. *Psychological Bulletin*, 111, 172-175.
- Metzler, J. & Shepard, R. N. (1982). Transformational studies of the internal representation of three-dimensional objects. In R. N. Shepard & L. A. Cooper (Eds.), *Mental images and their transformations* (pp. 25-71). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Miller, E. & Sethi, L. (1971a). The effect of hydrocephalus on perception. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 17, 77-81.
- Miller, E. & Sethi, L. (1971b). Tactile matching in children with hydrocephalus. *Neuropädiatrie*, 3, 191-194.
- Neidhardt, E. & Schmitz, S. (2001). Entwicklung von Strategien und Kompetenzen in der räumlichen Orientierung und in der Raumkognition: Einflüsse von Geschlecht, Alter, Erfahrung und Motivation. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 48, 262-279.
- Newcombe, N. S. & Huttenlocher, J. (2000). *Making space. The development of spatial representation and reasoning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Newcombe, N., Bandura, M. M. & Taylor, D. G. (1983). Sex differences in spatial ability and spatial activities. *Sex Roles*, 9, 377-386.
- Okagaki, L. & Frensch, P. A. (1994). Effects of video game playing on measures of spatial performance: Gender effects in late adolescence. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 15, 33-58.

- Parsons, L. M., Fox, P. T., Downs, J. H. & Glass, T. (1995). Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*, 375, 54-58.
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G. et al. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42, 555-562.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K. & Jackson, M. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, 28, 39-58.
- Petit, L. S. & Harris, I. M. (2005). Anatomical limitations in mental transformations of body parts. *Visual Cognition*, 12, 737-758.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1956). *The child's conception of space*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Platt, J. E. & Cohen, S. (1981). Mental rotation task performance as a function of age and training. *Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied*, 108, 173-178.
- Podzebenko, K., Egan, G. F. & Watson, J. D. G. (2005). Real and Imaginary Rotary Motion Processing: Functional Parcellation of the Human Parietal Lobe Revealed by fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 24-36.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). The rate of mental rotation of images: A test of a holistic analogue hypothesis. *Memory & Cognition*, 7, 19-28.
- Quaiser-Pohl, C., Lehmann, W. & Eid, M. (2004). The relationship between spatial abilities and representations of large-scale space in children - a structural equation modeling analysis. *Personality and Individual Differences*, 36, 95-107.
- Resnick, S. M., Berenbaum, S. A., Gottesman, I. I. & Bouchard, T. J. (1986). Early hormonal influences on cognitive functioning in congenital adrenal hyperplasia. *Developmental Psychology*, 22, 191-198.
- Richardson, J. T. E. (1994). Gender differences in mental rotation. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 435-448.
- Richter, W., Somorjai, R., Summers, R., Jarmasz, M., Menon, R. S., Gati, J. S. et al. (2000). Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 310-320.
- Rizzo, A., Buckwalter, J. G., Bowerly, T., McGee, J. S., van Rooyen, A., van der Zaag, C. et al. (2001). Virtual environments for assessing and rehabilitating cognitive/functional performance: A review of projects at the USC Integrated Media Systems Center. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10, 359-374.

- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Neumann, U., Chua, C., Van Rooyen, A., Larson, P. et al. (1999). Virtual environments for targeting cognitive processes: An overview of projects at the University of Southern California. *CyberPsychology & Behavior*, 2, 89-100.
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Neumann, U., Kesselman, C., Thiebaut, M., Larson, P. et al. (1998). The virtual reality mental rotation spatial skills project. *CyberPsychology & Behavior*, 1, 113-119.
- Rizzo, A. A., Wiederhold, M. & Buckwalter, J. G. (1998). Basic issues in the use of virtual environments for mental health applications. In G. Riva (Ed.), *Virtual environments in clinical psychology and neuroscience: Methods and techniques in advanced patient therapist interaction* (pp. 21-42). Amsterdam: IOS Press.
- Roberts, J. E. & Bell, M. A. (2000a). Sex differences on a computerized mental rotation task disappear with computer familiarization. *Perceptual and Motor Skills*, 91, 1027-1034.
- Roberts, J. E. & Bell, M. A. (2000b). Sex differences on a mental rotation task: Variations in electroencephalogram hemispheric activation between children and college students. *Developmental Neuropsychology*, 17, 199-223.
- Roberts, J. E. & Bell, M. A. (2002). The effects of age and sex on mental rotation performance, verbal performance and brain electrical activity. *Developmental Psychobiology*, 40, 391-407.
- Roberts, R. J. & Aman, C. J. (1993). Developmental differences in giving directions: Spatial frames of reference and mental rotation. *Child Development*, 64, 1258-1270.
- Rogosa, D., Brandt, D. & Zimowski, M. (1982). A growth curve approach to the measurement of change. *Psychological Bulletin*, 92, 726-748.
- Rosser, R. A., Ensing, S. S., Gilder, P. J. & Lane, S. (1984). An information-processing analysis of children's accuracy in predicting the appearance of rotated stimuli. *Child Development*, 55, 2204-2211.
- Rossion, B. & Pourtois, G. (2004). Revisiting Snodgrass and Vanderwart's object pictorial set: The role of surface detail in basic-level object recognition. *Perception*, 33, 217-236.
- Rovet, J. & Netley, C. (1980). The mental rotation task performance of Turner syndrome subjects. *Behavior Genetics*, 10, 437-443.
- Ruddle, R. A. & Jones, D. M. (2001). Manual and virtual rotation of three-dimensional object. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7, 286-296.

- Rüsseler, J., Scholz, J., Jordan, K. & Quaiser-Pohl, C. (2005). Mental rotation of letters, pictures, and three-dimensional objects in German dyslexic children. *Child Neuropsychology, 11*, 497-512.
- Saccuzzo, D. P., Craig, A. S., Johnson, N. E. & Larson, G. E. (1996). Gender differences in dynamic spatial abilities. *Personality and Individual Differences, 21*, 599-607.
- Sand, P. L., Taylor, N., Rawlings, M. & Chitnis, S. (1973). Performance of children with spina bifida manifesta on the Frostig Developmental Test of Visual Perception. *Perceptual and Motor Skills, 37*, 539-546.
- Sanders, B. & Soares, M. P. (1986). Sexual maturation and spatial ability in college students. *Developmental Psychology, 22*, 199-203.
- Schwartz, D. L. & Holton, D. L. (2000). Tool use and the effect of action on the imagination. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 26*, 1655-1665.
- Sekiyama, K. (1982). Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. *Perception and Psychophysics, 32*, 89-95.
- Shaffer, J., Friedrich, W. N., Shurtleff, D. B. & Wolf, L. (1985). Cognitive and achievement status of children with myelomeningocele. *Journal of Pediatric Psychology, 10*, 325-336.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science, 171*, 701-703.
- 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*, 3-11.
- Sherman, J. A. (1967). Problem of sex differences in space perception and aspects of intellectual functioning. *Psychological Review, 74*, 290-299.
- Simms, B. (1987). The route learning ability of young people with Spina Bifida and Hydrocephalus and their able-bodied peers. *Zeitschrift für Kinderchirurgie, 42*, 53-56.
- Sirigu, A. & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*, 910-919.
- Snodgrass, J. G. & Vanderwart, M. (1980). A standardized set of 260 pictures: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 6*, 174-215.

- Snow, J. H. (1990). Investigation of a mental rotation task with school-age children. *Journal of Psychoeducational Assessment, 8*, 538-549.
- Souvignier, E. (1999). Die Verbesserung räumlicher Fähigkeiten durch computerunterstützte Fördermassnahmen: Zwei Evaluationsstudien. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, 13*, 4-16.
- Souvignier, E. (2000). *Förderung räumlicher Fähigkeiten: Trainingsstudien mit lernbeeinträchtigter Kindern*. Münster: Waxmann.
- Souvignier, E. (2001). Training räumlicher Fähigkeiten. In K. J. Klauer (Ed.), *Handbuch Kognitives Training* (pp. 293-319). Göttingen: Hogrefe.
- Spain, B. (1974). Verbal and performance ability in pre-school children with spina bifida. *Developmental Medicine & Child Neurology, 16*, 773-780.
- Stanton, D., Wilson, P. N. & Foreman, N. (2002). Effects of early mobility on shortcut performance in a simulated maze. *Behavioural Brain Research, 136*, 61-66.
- Steiger, J. H. & Yuille, J. C. (1983). Longterm memory and mental rotation. *Canadian Journal of Psychology, 37*, 367-389.
- Tarr, M. J. & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology, 21*, 233-282.
- Tew, B. (1977). Spina bifida children's scores on the Wechsler Intelligence Scale for Children. *Perceptual and Motor Skills, 44*, 381-382.
- Tewes, U., Rossmann, P. & Schallberger, U. (2001). *HAWIK-III: Hamburger-Wechsler-Intelligenztest für Kinder, dritte Auflage*. Bern: Huber.
- Thorndyke, P. W. & Goldin, S. E. (1983). Spatial orientation: Theory, research, and application. In H. L. Pick & L. P. Acredolo (Eds.), *Spatial learning and reasoning skill* (pp. 195-217). New York: Plenum.
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Uecker, A., Obrzut, J. E. & Nadel, L. (1994). Mental rotation performance by learning disabled and Down's syndrome children: A study of imaginal development. *Developmental Neuropsychology, 10*, 395-411.
- Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills, 47*, 599-604.

- von Moers, A. (1998). Ätiologie und Pathogenese. In T. Michael, A. von Moers & A. E. Strehl (Eds.), *Spina bifida: Interdisziplinäre Diagnostik, Therapie und Beratung* (pp. 1-3). Berlin: de Gruyter.
- Voyer, D. (1995). Effect of practice on laterality in a mental rotation task. *Brain and Cognition*, 29, 326-335.
- Voyer, D., Rodgers, M. A. & McCormick, P. A. (2004). Timing conditions and the magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Memory & Cognition*, 32, 72-82.
- Voyer, D., Voyer, S. & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117, 250-270.
- Waber, D. P. (1976). Sex differences in cognition: A function of maturation rate? *Science*, 192, 572-573.
- Waber, D. P., Carlson, D. & Mann, M. (1982). Developmental and differential aspects of mental rotation in early adolescence. *Child Development*, 53, 1614-1621.
- Wallace, B. & Hofelich, B. G. (1992). Process generalization and the prediction of performance on mental imagery tasks. *Memory & Cognition*, 20, 695-704.
- Waller, D., Hunt, E. & Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence*, 7, 129-143.
- Wechsler, D. (1956). *Die Messung der Intelligenz Erwachsener*. Bern: Huber.
- Wechsler, D. (1991). *Manual for the Wechsler Intelligence Scale for Children - Third Edition*. San Antonio: The Psychological Corporation.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M. & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- Wills, K. E., Holmbeck, G. N., Dillon, K. & McLone, D. G. (1990). Intelligence and achievement in children with myelomeningocele. *Journal of Pediatric Psychology*, 15, 161-176.
- Willson, V. L. & Putnam, R. R. (1982). A meta-analysis of pretest sensitization effects in experimental design. *American Educational Research Journal*, 19, 249-258.
- Wilson, D. B. & Lipsey, M. W. (2001). The role of method in treatment effectiveness research: Evidence from meta-analysis. *Psychological Methods*, 6, 413-429.
- Wilson, P. H., Maruff, P., Butson, M., Williams, J., Lum, J. & Thomas, P. R. (2004). Internal representation of movement in children with developmental coordi-

- nation disorder: A mental rotation task. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 46, 754-759.
- Wilson, P. N., Foreman, N., Stanton, D. & Duffy, H. (2004). Memory for targets in a multi-level simulated environment: A comparison between able-bodied and physically disabled children. *British Journal of Psychology*, 95, 325-338.
- Witkin, H. A., Oltman, P. K., Raskin, E. & Karp, S. A. (1971). *Manual for the Embedded Figures Test, Children's Embedded Figures Test, and Group Embedded Figures Test*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Wohlschläger, A. (2001). Mental object rotation and the planning of hand movements. *Perception & Psychophysics*, 63, 709-718.
- Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 397-412.
- Wraga, M., Thompson, W. L., Alpert, N. M. & Kosslyn, S. M. (2003). Implicit transfer of motor strategies in mental rotation. *Brain and Cognition*, 52, 135-143.
- Yan, J. H., Thomas, J. R. & Downing, J. H. (1998). Locomotion improves children's spatial search: A meta-analytic review. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 67-82.
- Yeates, K. O., Enrile, B. G., Loss, N. & Blumenstein, E. (1995). Verbal learning and memory in children with myelomeningocele. *Journal of Pediatric Psychology*, 20, 801-815.
- Yuille, J. C. & Steiger, J. H. (1982). Nonholistic processing in mental rotation: Some suggestive evidence. *Perception & Psychophysics*, 31, 201-209.
- Zacks, J. M., Mires, J., Tversky, B. & Hazeltine, E. (2000). Mental spatial transformations of objects and perspective. *Spatial Cognition and Computation*, 2, 315-332.

Anhang

Anhang A: Übersicht der verwendeten Stimuli in den Experimenten 1 und 2.

Anhang B: Übersicht der verwendeten Stimuli in den Experimenten 3 und 4.

Anhang A

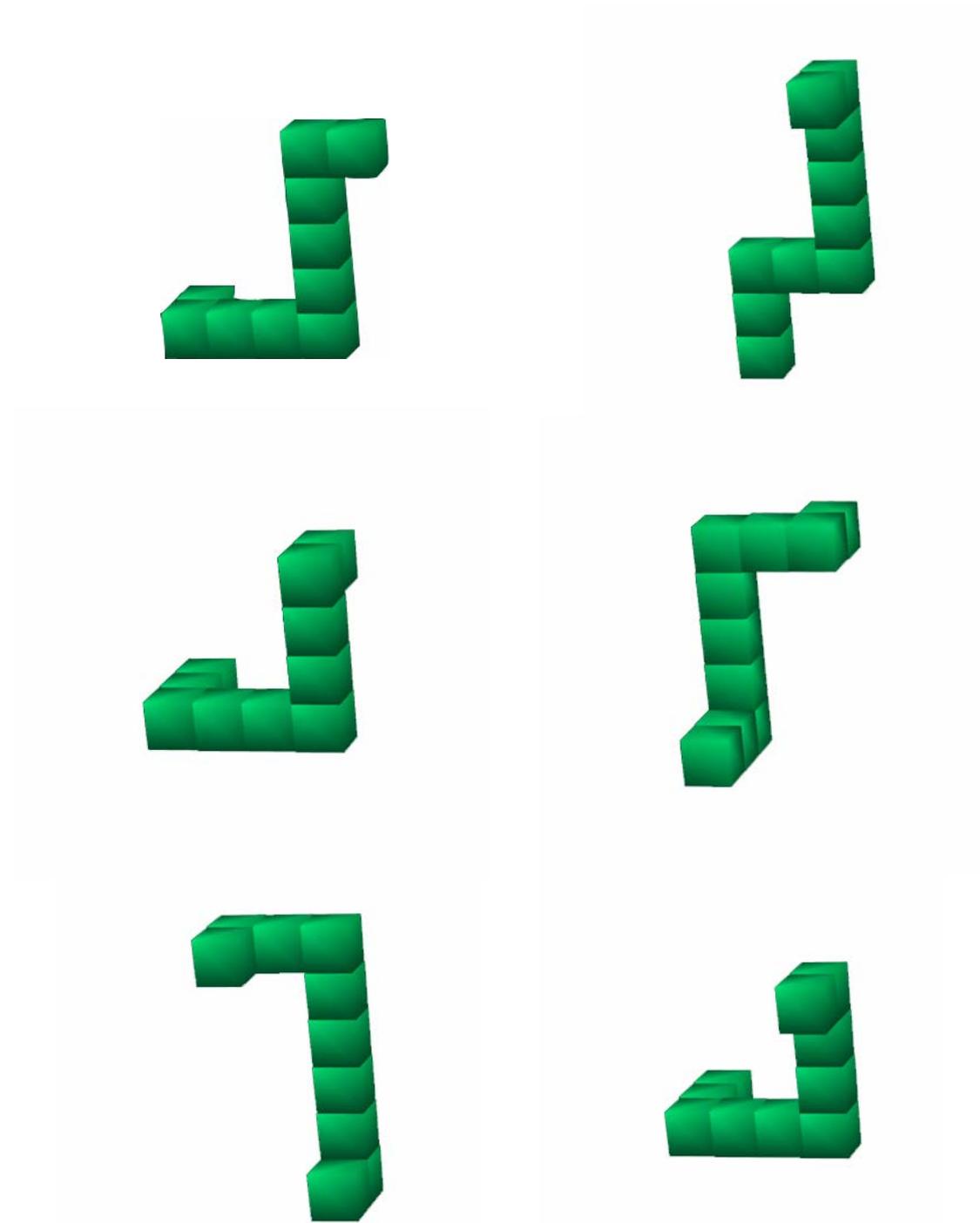


Abbildung A1: Würfelfiguren, die im Prätest des computerbasierten mentalen Rotationstests verwendet wurden (Experiment 2).

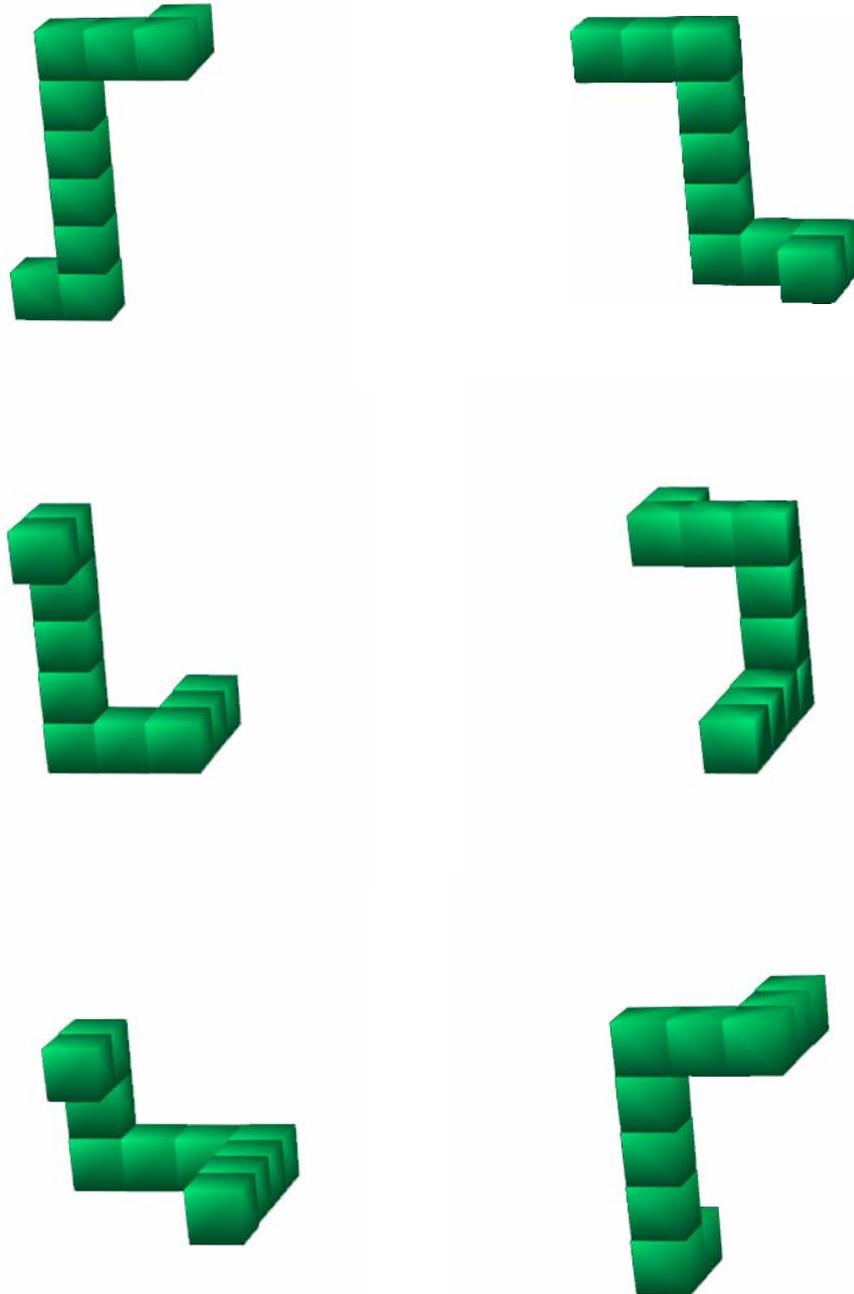


Abbildung A2: Würfelfiguren, die im computerbasierten mentalen Rotationstest verwendet wurden (Experiment 1). In Experiment 2 wurden diese Figuren im Posttest des computerbasierten mentalen Rotationstests verwendet und als „neu“ klassifiziert, da sie im vorherigen Training nicht präsentiert wurden.

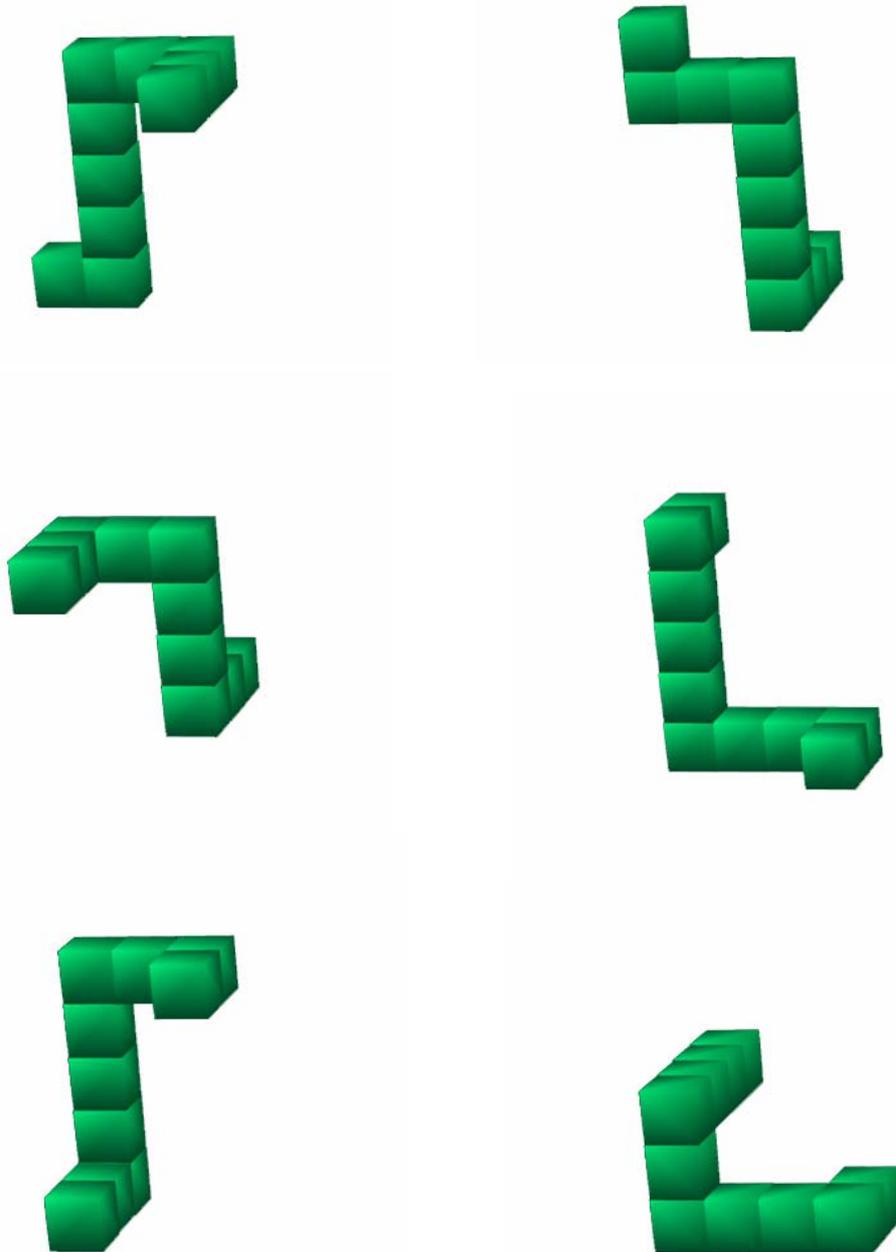


Abbildung A3: Würfelfiguren, die im computerbasierten mentalen Rotationstest verwendet wurden (Experiment 1). In Experiment 2 wurden diese Figuren im Posttest des computerbasierten mentalen Rotationstests und im manuellen Training verwendet und deshalb als „alt“ klassifiziert.

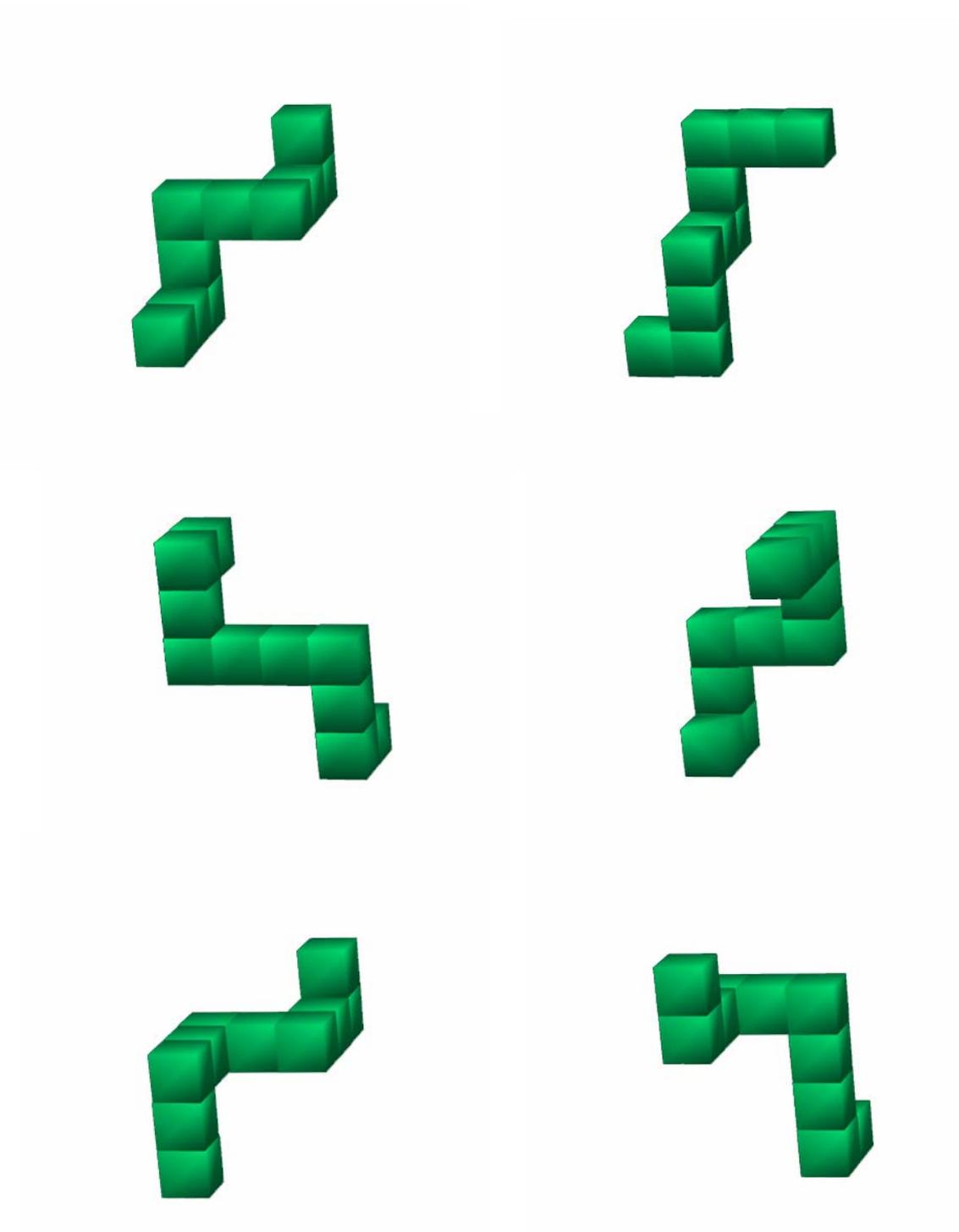


Abbildung A4: Würfelfiguren, die im manuellen Training verwendet wurden (Experiment 2).

Anhang B

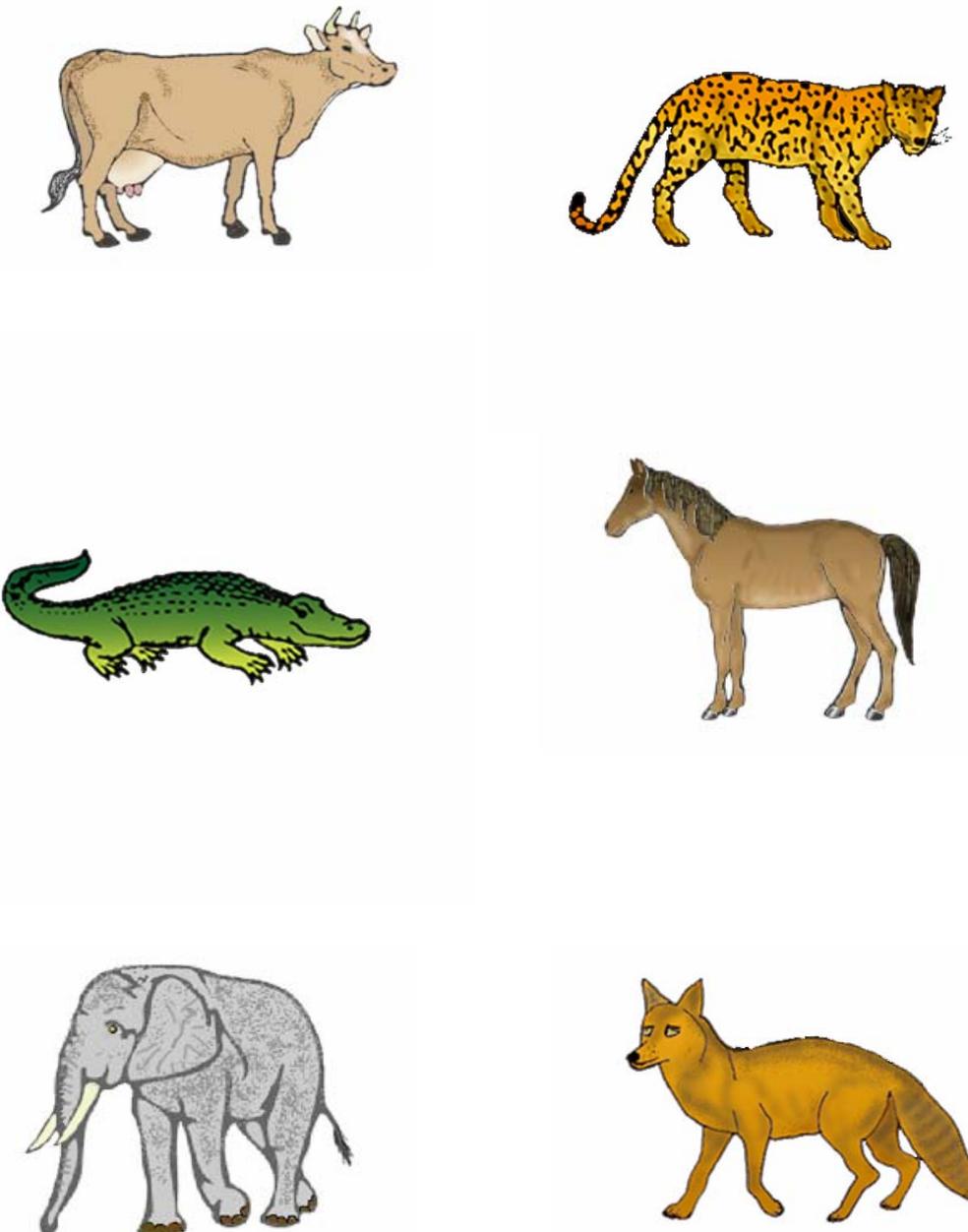


Abbildung B1: Tierbilder, die im Prätest des computerbasierten mentalen Rotationstests verwendet wurden (Experiment 3 und 4; aus Rossion & Pourtois, 2004).



Abbildung B2: Tierbilder, die im Posttest des computerbasierten mentalen Rotationstests verwendet und als „neu“ klassifiziert wurden, da sie im vorherigen Training nicht präsentiert wurden (Experiment 3 und 4; aus Rossion & Pourtois, 2004).

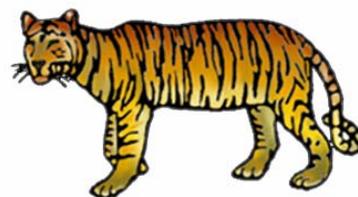
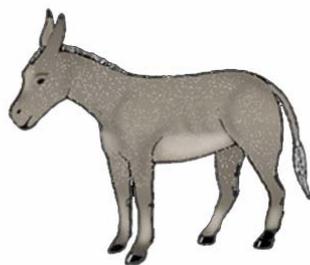
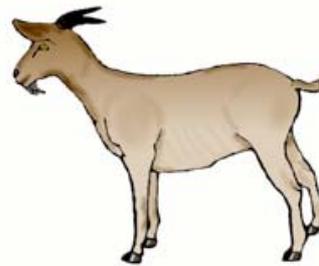
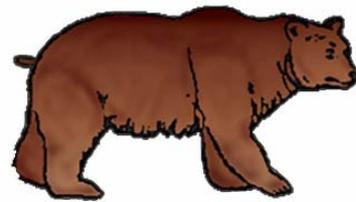
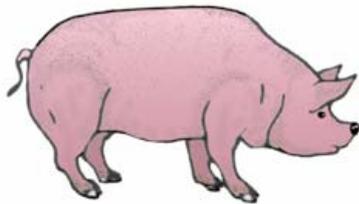


Abbildung B3: Tierbilder, die im Posttest des computerbasierten mentalen Rotationstests und im manuellen Training verwendet und deshalb als „alt“ klassifiziert wurden (Experiment 3 und 4; aus Rossion & Pourtois, 2004).

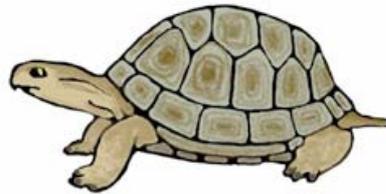
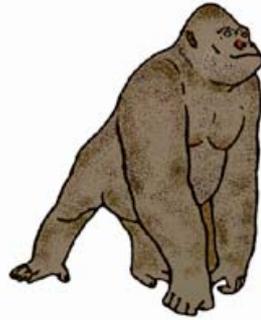
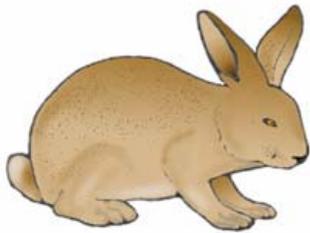


Abbildung B4: Tierbilder, die im manuellen Training verwendet wurden (Experiment 3 und 4 aus; Rossion & Pourtois, 2004).

Erklärung

Die hier vorgelegte Dissertation habe ich eigenständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt. Die Dissertation wurde in der vorgelegten oder in ähnlicher Form noch bei keiner anderen Institution eingereicht. Ich habe bisher keine erfolglosen Promotionsversuche unternommen.

Düsseldorf, den 23.03.2006

(Gunnar Wiedenbauer)