



Mentale Rotation bei Kindern - Trainingseffekte und physiologische Grundlagen

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

vorgelegt von
Léonie Frederica Lange
geboren in Essen

Düsseldorf, Mai 2009

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

Koreferentin: Prof. Dr. Petra Jansen

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
1.1	Abstract	7
2	Allgemeine Einleitung	9
2.1	Mentale Rotation	10
2.1.1	Experimental-psychologische Grundlagen	10
2.1.2	Neurowissenschaftlicher Forschungsstand	11
2.1.2.1	Neurophysiologischer Forschungsstand	12
2.2	Einflussfaktoren auf die mentale Rotationsleistung	14
2.2.1	Zusammenhang zwischen Geschlecht, bzw. Hormonen und mentaler Rotation	14
2.2.2	Zusammenhang zwischen der Aufgabenschwierigkeit und mentaler Rotation	15
2.2.3	Zusammenhang zwischen der Rotationsstrategie und mentaler Rotation ...	17
2.2.4	Zusammenhang zwischen perzeptueller und mentaler Rotation	17
2.2.5	Zusammenhang zwischen motorischen Prozessen und mentaler Rotation..	18
2.3	Trainierbarkeit mentaler Rotation	20
2.3.1	Zusammenhang zwischen mentaler Rotation und Bewegung	21
2.3.2	Motorisches Training mentaler Rotation	22
2.4	Zusammenhang von Jonglieren und mentaler Rotation	22
2.5	Zentrale Fragestellungen	27
3	Experimente	29
3.1	Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotationsleistung bei Kindern	29
3.1.1	Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotation mit 3D Stimuli bei Kindern	29
3.1.2	Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotation mit 2D Stimuli bei Kindern	31
3.2	Neuropsychologische Grundlagen mentaler Rotation bei Kindern	33
3.2.1	Der Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern	33
3.2.2	Der Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern ist nicht stimulusspezifisch	36
4	Allgemeine Diskussion	39
4.1	Zusammenhang motorischer und kognitiver Prozesse	39
4.2	Amplitudenmodulation mentaler Rotation bei Kindern	42
4.3	Zentrale Thesen	43
5	Ausblick	45
5.1	Einfluss motorischer Trainings auf die mentale Rotationsleistung	45
5.1.1	Verwendung anderer Stimuli	45
5.1.2	Verwendung anderer motorischer Trainings	46

5.1.3	Einfluss eines Jongliertrainings auf andere kognitive Fähigkeiten	46
5.2	Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation bei Kindern	47
5.2.1	Untersuchung anderer Stimuli	47
5.2.2	Untersuchung der verwendeten Strategien	48
5.3	Betrachtung neuronaler Plastizitätseffekte beim Jonglieren.....	48
6	Literatur	51
7	Einzelarbeiten	64

1 Zusammenfassung

Die Trainierbarkeit mentaler Rotation ist das Thema vieler Studien gewesen, allerdings existiert nur eine geringe Anzahl Studien, die sich mit dem Einfluss eines motorischen Trainings auf die Fähigkeit zu mentaler Rotation befassen. Darüber hinaus sind die in den Studien zu diesem Thema durchgeführten Trainings meist alltagsfern, wurden mit erwachsenen Versuchspersonen durchgeführt und zeigen keine neurophysiologischen Veränderungen nach einem Training auf.

Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit als erstes mit dem Einfluss eines Jongliertrainings auf die Reaktionszeiten in einer mentalen Rotationsaufgabe bei Kindern. Jonglieren ist eine alltagsnahe motorische Aufgabe, die sowohl auf theoretischer als auch auf experimenteller Ebene Zusammenhänge mit dem Prozess der mentalen Rotation aufweist. Im ersten Experiment zeigte sich, dass sich in einer Kindergruppe, welche ein dreimonatiges Jongliertraining erhalten hatte, die Leistung in einem Rotationstest mit dreidimensionalen Stimuli signifikant stärker verbesserte als die Leistung in einer Kindergruppe, die während der selben Zeit ein leichtes Krafttraining erhalten hatte. Die Frage, ob ein Jongliertraining, welches dreidimensional ist, auch einen Effekt auf die mentale Rotation weniger komplexer Stimuli hat, wurde im zweiten Experiment untersucht. In diesem wurden zweidimensionale Polygone statt dreidimensionaler Würfelfiguren als Reizmaterial verwendet. Hierbei zeigte sich, dass die Leistungsverbesserung nicht mehr spezifisch für das Jongliertraining war. Das Jongliertraining, als ein Training, welches die dreidimensionale räumliche Koordination der Hände fordert, zeigte also nur in einer mentalen Rotationsaufgabe einen Effekt, welche auch dreidimensionale Stimuli verwendete. Folglich müssen Bewegung und Reizmaterial die gleichen Dimensionen besitzen, damit sich ein Effekt der Motorik in einer mentalen Rotationsaufgabe findet.

Um eine Basis zu schaffen, auf welcher die neurophysiologischen Veränderungen nach einem motorischen Training beurteilt werden können, befasst sich die vorliegende Arbeit als zweites mit den elektrophysiologischen Korrelaten mentaler Rotation bei Kindern. Die wenigen bisher existierenden Studien, die zeigen, dass die bei Erwachsenen bekannte Amplitudenmodulation in Abhängigkeit von der Winkeldisparität der in einer mentalen Rotationsaufgabe dargebotenen Reize auch bei Kindern aufzuzeigen ist, haben alle überlernte Buchstaben als Reizmaterial verwendet. Im dritten Experiment dieser Arbeit konnte die Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation bei Kindern erstmals mit einfachen zweidimensionalen Tierzeichnungen nachgewiesen werden. Um zu überprüfen, ob der Amplitudeneffekt bei Kindern auch bei komplexeren Stimuli zu finden ist, wurden im vierten Experiment PMA-Figuren als Stimulusmaterial verwendet. Auch mit diesen zweidimensionalen Reizen fand sich eine Modulation der Amplituden in Abhängigkeit vom Rotationswinkel, allerdings war der Effekt weniger deutlich. Dies lässt vermuten, dass Kinder um komplexe Stimuli zu rotieren andere Strategien einsetzen als bei der Rotation einfacher Stimuli und dies in geringeren Amplitudeneffekten deutlich wird.

Basierend auf den Ergebnissen der vier Experimente dieser Arbeit lässt sich vermuten, dass die Frage neuronaler Plastizitätseffekte nach einem Jongliertraining bei Kindern mittels EEG wohl nicht zu beantworten ist, da zum Nachweis von Reaktionszeiteffekten nach einem Training einerseits und Amplitudeneffekten andererseits scheinbar Reize unterschiedlicher Komplexität verwendet werden müssen.

1.1 Abstract

To train mental rotation has been the topic of many studies, but there are only a few studies concerning the influence of a motor training on mental rotation performance. Furthermore, those motor trainings were mostly disconnected from everyday-life, realized only with adult participants and did not show neurophysiological changes due to training.

Therefore, the first purpose of this thesis is examining the influence of a juggling training on reaction times in a mental rotation task with children. Juggling is an everyday-life like motor task, which is theoretically as well as experimentally linked with the process of mental rotation. The first experiment showed that the gain in mental rotation speed with three-dimensional stimuli due to training of juggling over a period of three month is larger than the gain due to light strength training over the same time period. Consequential, it raises the question whether a three-dimensional training of juggling also enhances the mental rotation performance with less complex stimuli. This was examined in a second experiment, in which, in contrast to the first experiment, two-dimensional polygons instead of three-dimensional cube figures were used as stimulus material. Here, the improvement of performance was shown to be no more specific for a training of juggling. The juggling training, which requires a spatial, three-dimensional coordination of hands, just showed an effect in a mental rotation task, if three-dimensional stimuli were used. Following from that, movement and stimulus material should share the same dimensions to achieve a motoric effect in a mental rotation task.

To provide a basis for evaluation the neurophysiological changes due to a motoric training, this thesis is secondly concerned with the electrophysiological correlates of mental rotation in children. Until now, there is no study showing that the amplitude modulation as a correlate of mental rotation, which is well documented in adults, is even present in children. This was shown in the third experiment with simple two-

dimensional drawings of animals for the first time. To verify, whether the effect of amplitude in children is even present with more complex stimuli, two-dimensional PMA-figures were used as stimulus material in the forth experiment. Like in the previous experiment, the amplitude modulation was a function of angular disparity, but the effect was not as strong as before. In our opinion, children use different strategies to rotate complex than to rotate simple stimuli and this causes lower effects of amplitude modulation.

Based on the results of the four present experiments, we believe that EEG is not an appropriate method to demonstrate effects of neuronal plasticity after training of juggling, since stimuli of different complexity have to be used to detect effects of reaction time due to training on the one hand, and effects of amplitude on the other hand.

2 Allgemeine Einleitung

Räumliche Fähigkeiten werden oft, parallel zu verbalen Fähigkeiten, als ein fundamentaler Faktor menschlicher Intelligenz bezeichnet. Dieser Faktor (Thurstones Faktor *Space*, 1938) lädt z. B. in Tests zu Wahrnehmungsgeschwindigkeit, räumlicher Orientierung und anderen bildlichen Aufgaben hoch (siehe z. B. Ekstrom, French & Harman, 1979). Darüber hinaus bildet räumliches Vorstellungsvermögen die kognitive Basis für Problemlöse-Prozesse (Geary, Sauls, Liu & Hoard, 2000), Mathematik (Hegarty & Kozhevnikov, 1999) und wissenschaftlich basiertes Arbeiten (Peters, Chisholm & Laeng, 1995). Aber auch im Alltag ist räumliches Vorstellungsvermögen unentbehrlich. So muss man schließlich, sobald man z. B. nach einem Objekt greifen will, die Startposition der eigenen Hand sowie die Zielposition des Objektes kennen und beide in Verbindung miteinander bringen, um eine adäquate Greifbewegung ausführen zu können. Nach Linn und Petersen (1985) lassen sich räumliche Fähigkeiten in drei Bereiche aufgliedern: Räumliche Wahrnehmung, räumliche Visualisierung und mentale Rotation, wobei mentale Rotation die wichtigste Komponente darstellt. In vielen Berufen ist die Fähigkeit zur mentalen Rotation äußerst wichtig, so z. B. im Ingenieurs- und Architekturwesen oder in der Medizin. Im medizinischen Arbeitsfeld spielt sie vor allem im Bereich der minimal invasiven Therapie oder in der Beurteilung der Ergebnisse bildgebender Verfahren eine große Rolle (siehe Hegarty & Waller, 2005). Aber auch schon im schulischen Bereich wird der mentalen Rotation, z. B. bei der Förderung räumlicher Kompetenzen und des Problemlöseverhaltens, eine große Bedeutung zugewiesen (Souvignier, 2000).

Im Folgenden soll zunächst der experimental-psychologische, sowie der neurowissenschaftliche Forschungsstand mentaler Rotation erläutert werden. Im Anschluss wird auf die Trainierbarkeit mentaler Rotation und den Zusammenhang

physischer und kognitiver Leistung eingegangen. Aus diesen Darstellungen ergeben sich die zentralen Fragestellungen für die vier Experimente dieser Arbeit.

2.1 Mentale Rotation

Mentale Rotation bezeichnet nach Shepard und Metzler (1971) die Fähigkeit räumliche Informationen mental zu repräsentieren und diese Repräsentation durch Drehung um die drei Raumachsen zu transformieren.

2.1.1 Experimental-psychologische Grundlagen

In Aufgaben zur mentalen Rotation müssen Versuchspersonen eine kognitive Repräsentation eines visuellen Stimulus „mental rotieren“ und somit in Kongruenz zu einem anderen visuell dargebotenen Stimulus (oder einer Gedächtnis-Repräsentation) bringen. Daraufhin müssen sie entscheiden, ob diese beiden Repräsentationen übereinstimmen oder unterschiedlich, d. h. Spiegelbilder voneinander, sind. In ihrer grundlegenden Studie zur mentalen Rotation zeigten Shepard und Metzler (1971), dass die Zeit, die benötigt wird um diese Entscheidung zu treffen, linear mit der Winkeldifferenz der präsentierten Stimuli ansteigt. Dabei zeigte sich kein Unterschied zwischen einer Rotation in der Bildebene und in der Bildtiefe (Shepard & Metzler, 1971). Diese systematische Variation der Winkeldisparität und der Reaktionszeit lässt sich durch eine Regressionsgerade beschreiben. Der Ordinatenschnittpunkt und die Steigung dieser Regressionsgeraden stellen nach Cooper und Shepard (1973) verschiedene kognitive Prozesse der mentalen Rotation dar: Die Steigung der Rotationsfunktion bildet den Prozess der mentalen Rotation an sich ab, der Achsenabschnitt umfasst die Prozesse der Stimulusenkodierung, des Vergleichs und der motorischen Antwortreaktion. Der sequentielle Ablauf dieser Prozesse wurde durch eine elektrophysiologische Studie von Heil und Rolke (2002) bestätigt.

Mentale Rotation stellt ein internes Analogon einer externen Rotation dar (Cooper, 1976; Metzler & Shepard, 1982) und Shepard und Shipman (1970) gehen darüber hinaus davon aus, dass es sich bei mentaler Rotation um einen isomorphen Prozess zweiter Ordnung handelt. Das bedeutet, dass der neurophysiologische Prozess einer mentalen Rotation und einer wahrgenommenen externen Rotation zum größten Teil identisch sind.

Marmor (1975) konnte zeigen, dass Kinder schon im Alter von 5 Jahren die Fähigkeit besitzen mentale Rotationsaufgaben zu lösen. Auch Courbois (2000) geht davon aus, dass schon Kinder im Kindergartenalter mental rotieren können. Er gibt aber an, dass das verwendete Reizmaterial einfach gestaltet sein muss. Das bedeutet, dass die Reize deutliche Achsen besitzen muss, an Hand derer das Kind z. B. „oben“ und „unten“ eines Objektes bestimmen kann. Auch eine lineare Beziehung zwischen den Reaktionszeiten und der Winkeldisparität findet man bei Kindern, wobei diese im Durchschnitt aber langsamer mental rotieren als Erwachsene (Kail, Pellegrino & Carter, 1980). Ab dem Alter von 10 Jahren können Kinder auch unfamiliäre Reize fast so gut und schnell mental rotieren wie Erwachsene (Hardwick, McIntyre & Pick, 1976).

2.1.2 Neurowissenschaftlicher Forschungsstand

Der kognitive Prozess mentaler Rotation scheint im parietalen Kortex implementiert zu sein. Die Aktivierung des Parietallappens während mentaler Rotation wurde konsistent in funktionellen Magnetresonanztomographie- (fMRT; z. B. Cohen, Kosslyn, Breiter & DiGirolamo, 1996; Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski & Jäncke, 2001), Positronen-Emissions-Tomographie- (PET; z. B. Harris, Egan, Sonkkila, Tochon-Danguy, Paxinos & Watson, 2000) und Läsionsstudien (z. B. Ditunno & Mann, 1990) gefunden.

Eine Aktivierung des motorischen Kortex (Area M1) ist bei mentaler Rotation von Körperteilen, wie z. B. Zeichnungen von Händen, empirisch belegbar (Kosslyn,

DiGirolamo, Thompson & Alpert, 1998; Parsons et al., 1995). Einige Studien zeigten auch die Aktivierung prämotorischer und motorischer Areale bei der Präsentation anderer Stimuli (Cohen et al., 1996; Kosslyn, Thompson, Wraga & Alpert, 2001). Sprachliche Areale werden bei mentaler Rotation nicht aktiviert (Jordan et al., 2001). Die neurowissenschaftliche Forschung zur Lateralisierung des mentalen Rotationsprozesses zeigt ein heterogenes Bild. Viele Studien konnten zeigen, dass mentale Rotation, als räumliches Analogon zur linkslateralisierten Sprache, ein rechtshemisphärischer Prozess ist (z. B. Farah & Hammond, 1988; Ditunno & Mann, 1990; Papanicolaou et al., 1987). Es gibt allerdings auch Studien, die eine bilaterale (z. B. Cohen & Polich, 1989) oder sogar eine linkshemisphärische Aktivierung (z. B. Alivisatos & Petrides, 1997; Corballis & Sergent, 1989) bei mentaler Rotation gefunden haben. Die Lateralisierung des räumlichen Transformationsprozesses der mentalen Rotation scheint von einer Reihe miteinander interagierender Faktoren bedingt zu sein (Johnson, McKenzie & Hamm, 2002; Roberts & Bell, 2003; Tomasino & Rumiati, 2004).

2.1.2.1 Neurophysiologischer Forschungsstand

Auch in Studien die elektrophysiologische Verfahren benutzen konnte eine Aktivierung des parietalen Kortex bei mentaler Rotation belegt werden. Darüber hinaus zeigen Experimente mit Erwachsenen, dass der Prozess der mentalen Rotation systematisch mit bestimmten Charakteristika in ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs), welche aus dem Elektro-Enzephalogramm (EEG) extrahiert werden, assoziiert ist: 300 bis 900 ms nach Präsentation des Stimulus (Rugg & Coles, 1995) tritt eine positive EKP-Komponente auf, deren Amplitude invers zu der Orientierung des präsentierten Reizes ist. Das bedeutet, dass die Amplitude dieser Komponente umso negativer wird, je größer die Winkeldisparität des Stimulus ist (Perronet & Farah, 1989; Rösler, Schumacher & Sojka, 1990; Wijers, Otten, Feenstra, Mulder & Mulder, 1989). Wijers et al., ebenso wie Heil, Bajric, Rösler und

Hennighausen (1996), nehmen an, dass diese Amplitudenmodulation durch die Überlagerung zweier funktionell unabhängiger Potentiale entsteht. Auf der einen Seite wird durch die Präsentation und Klassifikation des Stimulus eine positive Komponente (P300; siehe z. B. Johnson, 1986) hervorgerufen, deren Amplitude unabhängig von mentaler Rotation ist. Auf der anderen Seite wird durch den Prozess der mentalen Rotation ein langsames negatives Potential ausgelöst, welches simultan zur P300 auftritt und diese Positivierung überlagert (siehe Abb. 1).

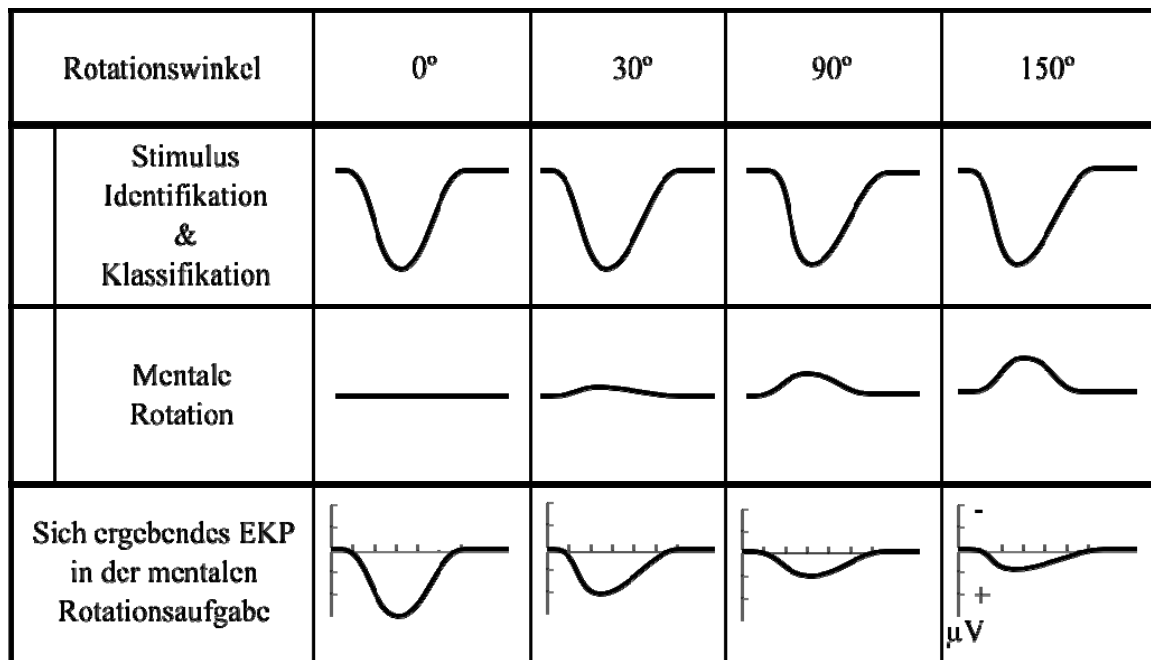


Abbildung 1: Vereinfachtes Modell der Entstehung von EKPs bei mentaler Rotation (übernommen und angepasst aus Heil et al., 1996).

In unterschiedlichen Studien wurde gezeigt, dass diese Amplitudenmodulation tatsächlich auf den Prozess der mentalen Rotation an sich zurückgeführt werden kann und nicht durch andere Prozesse hervorgerufen wird, die ebenfalls nötig sind um eine mentale Rotationsaufgabe zu lösen (für einen Überblick siehe Heil, 2002).

Die Befundlage zu EEG-Daten bei Kindern ist nicht so umfangreich. Es konnte gezeigt werden, dass die Topographie der Hirnaktivierung während mentaler Rotation bei Kindern und Erwachsenen ähnlich ist (Booth et al., 1999), die EEG-

Amplituden aber deutlich vom Alter beeinflusst werden (Gasser, Verleger, Bacher & Sroka, 1988). Bei Kindern sind die Amplituden im Allgemeinen größer als bei Erwachsenen, was zum Teil eventuell an den geringeren elektrophysiologischen Widerständen der Kinder liegt, welche durch die dünnere Kopfhaut und den noch nicht so dicken Schädelknochen der Kinder bedingt sind. Des Weiteren ist bei Kindern die interindividuelle Variabilität im EEG größer als bei Erwachsenen (Benninger, Matthis & Scheffner, 1984; Roberts & Bell, 2002).

Die Studien von Heil und Jansen-Osmann (2007) und Jansen-Osmann und Heil (2007a) sind bisher die einzigen Studien, die sich mit der Amplitudenmodulation bei mentaler Rotation von Kindern befasst haben. Hier zeigte sich, dass auch bei Kindern eine zunehmende Aktivierung mit steigender Winkeldisparität gefunden wurde. Allerdings benutzen Heil und Jansen-Osmann in beiden Studien nur Buchstaben als Stimulus-Material.

2.2 Einflussfaktoren auf die mentale Rotationsleistung

In der Forschung sind viele Faktoren bekannt, die einen Einfluss auf die Leistung in mentalen Rotationsaufgaben haben können. In den folgenden Abschnitten sind einige dieser Faktoren dargestellt.

2.2.1 Zusammenhang zwischen Geschlecht, bzw. Hormonen und mentaler Rotation

Geschlechtsunterschiede zugunsten von Männern in der mentalen Rotation sind eine populäre „Tatsache“ (siehe z. B. Pease & Pease, 2000) und in ihrem Übersichtsartikel zeigen Linn und Petersen (1985) auch, dass sich unter den räumlichen Fähigkeiten die größten und substantiellsten Geschlechtsunterschiede in Untersuchungen zu mentaler Rotation finden. Tatsächlich ist die Datenlage zum Einfluss des Faktors „Geschlecht“ auf die Leistung in mentaler Rotation heterogen und hängt eng mit der in der jeweiligen Studie angewandten Methode zusammen. In psychometrischen

Tests, die nur eine Gesamtleistung wiedergeben, finden sich meist deutliche Unterschiede zwischen Männern und Frauen in der Richtung, dass Frauen mehr Fehler machen. In Reaktionszeitstudien, welche eine Prozessanalyse ermöglichen, werden dagegen in manchen Studien Geschlechtsunterschiede gefunden (z. B. Gilger & Ho, 1989), in anderen dagegen nicht (z. B. Desrocher, Smith & Taylor, 1995).

Auch die Befunde zu Geschlechtunterschieden bei Kindern sind widersprüchlich. Kerns und Berenbaum (1991) zeigten, dass Jungen signifikant bessere Leistungen zeigten als gleichaltrige Mädchen (9-13 Jahre); Alyman und Peters (1993) fanden dagegen fast keine Geschlechtseffekte bei 7 bis 9jährigen Kindern.

Offensichtlich werden die Geschlechtsunterschiede noch von anderen Faktoren moduliert. So scheint die Größe der gefundenen Unterschiede von der Zyklusvariation der Sexualhormone abzuhängen. Hausmann, Slabbekoorn, Van Goozen, Cohen-Kettenis und Güntürkün (2000), sowie McCormick und Teillon (2001) wiesen nach, dass Frauen in der Menstruationsphase signifikant bessere Rotationsleistungen zeigten als Frauen in der Lutealphase.

Auch scheinen Geschlechtsunterschiede umso stärker ausgeprägt zu sein, je komplexer das Stimulusmaterial ist (Collins & Kimura, 1997; Heil & Jansen-Osmann, 2008; siehe aber dagegen Titze, Heil & Jansen, 2008).

2.2.2 Zusammenhang zwischen der Aufgabenschwierigkeit und mentaler Rotation

Der im Abschnitt 2.1.1 dargestellte Zusammenhang von Winkeldisparität und Reaktionszeit konnte mit unterschiedlichem Reizmaterial gezeigt werden (z. B. Collins & Kimura, 1997; Cooper & Shepard, 1973; Kosslyn et al., 1998; Voyer & Bryden, 1990). Allerdings zeigt sich, dass die Geschwindigkeit, mit der die mentale Rotation durchgeführt wird (invertierter Wert der Steigung der Rotationsfunktion), maßgeblich von der Art des verwendeten Stimulusmaterials beeinflusst wird. Shepard und Metzler (1971) fanden in ihrer grundlegenden Studie zur mentalen

Rotation mit dreidimensionalen Würfelfiguren eine Rotationsgeschwindigkeit von etwa 60°/s. Die Rotationsgeschwindigkeit in der Studie von Cooper und Shepard (1973) mit alphanumerischen Zeichen betrug dagegen etwa 330°/s und war damit fast sechsmal höher. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass die Rotationsgeschwindigkeit von der Komplexität des Reizmaterials beeinflusst wird. Diesen Zusammenhang zeigten z. B. Jansen-Osmann und Heil (2007b) für unterschiedliches Stimulusmaterial, Bethell-Fox und Shepard (1988) für schachbrettartige Matrizen, Yuille und Steiger (1992) für Würfelfiguren, sowie Heil und Jansen-Osmann (2008) für die mentale Rotation von Polygonen unterschiedlicher Schwierigkeit. Allerdings galt der Befund in der letzten Studie nur bei weiblichen, nicht jedoch bei männlichen Versuchspersonen.

Cooper (1975) benutze ebenfalls Polygone als Stimulusmaterial, konnte allerdings keine Effekte der Reizkomplexität auf die Reaktionszeit feststellen. Auch Shepard und Metzler (1988) fanden diese Effekte nicht, konnten aber zeigen, dass der Aufgabentyp (Präsentation eines vs. zweier Stimuli) einen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit hatte. Musste ein Objekt mit einer internen Repräsentation verglichen werden (Präsentation eines Stimulus), dann war die Rotationsgeschwindigkeit ca. dreimal höher als wenn ein Objekt in Kongruenz mit einem zweiten extern präsentierten Objekt gebracht werden musste (Präsentation zweier Stimuli). Die Studien von Just und Carpenter (1976), sowie von Steiger und Yuille (1983) fanden die gleichen Ergebnisse.

Besonderes Augenmerk muss auf die Verwendung von Buchstaben als Reizmaterial gelegt werden. Diese sind überlernte Symbole, welche im Vergleich zu anderen Objekten ähnlicher Komplexität deutlich schneller rotiert werden können (siehe z. B. Jordan, Wüstenberg, Heinze, Peters und Jäncke, 2002) und eine curvilineare Rotationsfunktion aufweisen (Tarr & Pinker, 1989).

2.2.3 Zusammenhang zwischen der Rotationsstrategie und mentaler Rotation

Das Postulat von Shepard und Shipman (1970), dass mentale Rotation ein isomorpher Prozess zweiter Ordnung sei, wird in der Forschung kontrovers diskutiert, denn es legt nahe, dass bei mentaler Rotation der Stimulus immer als Ganzes, also holistisch, rotiert wird. Empirische Evidenz für diese holistische Verarbeitung liefern z. B. die Studien von Bethell-Fox und Shepard (1988), Cooper und Shepard (1982) und Kosslyn (1981). Dagegen, also für eine stückweise, analytische Rotation sprechen z. B. die Studien von Just und Carpenter (1976), sowie von Yuille und Steiger (1982). Die heterogene Datenlage könnte dadurch erklärt werden, dass die angewandte Rotationsstrategie sowohl durch die Schwierigkeit der zu lösenden Aufgabe, als auch durch die Fähigkeit der bearbeitenden Versuchsperson bedingt ist (Corballis, 1997; Just & Carpenter, 1985; Glück & Fitting, 2003). Ist das Reizmaterial einfach oder besitzt eine Person hohe individuelle räumliche Fähigkeiten, so wird eine holistische Rotationsstrategie angewandt. Ist das Reizmaterial dagegen komplex, bzw. besitzt eine Person nur geringe räumliche Fähigkeiten, so ist die angewendete Rotationsstrategie analytisch. Diese angewandten Strategien sind ohne Übung konstant (Contreras, Peña, Rubio & Santacreu, in press), lassen sich aber durch ein Training verändern (Glück, Machat, Jirasko & Rollett, 2002).

2.2.4 Zusammenhang zwischen perzeptueller und mentaler Rotation

Geht man davon aus, dass der Prozess der mentalen Rotation analog zu einer physikalischen Rotation ist, dann sollte es Zusammenhänge zwischen einer real wahrgenommenen, perzeptuellen und einer mentalen Rotation geben. So konnten Corballis und McLaren (1982) sowie Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (1997) zeigen, dass der durch Blicken auf eine sich drehende Scheibe ausgelöste Bewegungsnacheffekt mit dem Prozess der mentalen Rotation interferierte. Bei

kongruenter Richtung des Nacheffekts und der mentalen Rotation verkürzte sich die Reaktionsgeschwindigkeit, bei inkongruenter verlängerte sie sich. Darüber hinaus belegten Podzebenko, Egan und Watson (2005) in einer bildgebenden Studie, dass die gleichen kortikalen Areale bei einer mentalen, sowie bei einer wahrgenommenen externen Rotation aktiv sind.

2.2.5 Zusammenhang zwischen motorischen Prozessen und mentaler Rotation

Auch bei Durchführung einer mentalen Rotation und gleichzeitiger motorischer Rotation tritt Interferenz auf. In der Studie von Wexler, Kosslyn und Berthoz (1998) lernten Versuchspersonen manuelle Rotationen mittels eines Joysticks in zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auszuführen. Sollte danach eine mentale Rotation gleichzeitig mit der erlernten manuellen Rotation ausgeführt werden, waren die Versuchspersonen langsamer, wenn sie den Joystick entgegen der mentalen Rotationsrichtung drehen mussten. Des Weiteren stieg bei einer schnellen motorischen Rotation die Reaktionszeitdifferenz zwischen kompatiblen und inkompatiblen Rotationen je höher die Winkeldisparität in der mentalen Rotationsaufgabe war, bei der langsamen motorischen Rotation sank sie dagegen. Wexler et al. erklären diese Ergebnisse dadurch, dass auch bei mentaler Rotation ein motorischer Handlungsplan erstellt wird. Dieser wird zwar nicht offen ausgeführt, wird aber vom Handlungsplan einer wirklichen motorischen Rotation gestört. Auch Wohlschläger und Wohlschläger (1998) nahmen in ihrer *Common Processing* Hypothese an, dass die Interaktion von mentaler und motorischer Rotation in der Ebene der Handlungsplanung begründet ist. Sie postulierten einen gemeinsamen Prozess, der bei einer manuellen Rotation durch motorische Befehle Kontrolle ausübt und bei mentaler Rotation die Änderung der visuell-räumlichen Repräsentation bewirkt. In ihrer Studie konnten Wohlschläger und Wohlschläger zeigen, dass die Reaktionszeiten bei manueller und mentaler Rotation gleichermaßen von der

Winkeldisparität sowie der Rotationsachse beeinflusst werden, und dass Handbewegungen, die eine Rotation in der Bildebene simulierten, mit der Rotationszeit in einer mentalen Rotationsaufgabe interferierten. In einer späteren Studie belegt Wohlschläger (2001), dass tatsächlich die bloße Planung einer inkompatiblen Handbewegung die Reaktionszeit in einer mentalen Rotationsaufgabe verlangsamt.

Für das Vorhandensein motorischer Prozesse bei mentaler Rotation sprechen auch die Untersuchungen von Sekiyama (1982) und von Petit und Harris (2005). Sie konnten belegen, dass bei der mentalen Rotation von Bildern menschlicher Hände die Versuchspersonen für anatomisch unmögliche Drehungen deutlich länger brauchten als für anatomisch mögliche. Die Studie von Sack, Lindner und Linden (2007) belegt, dass besonders die Rotation von Bildern menschlicher Hände durch eine gleichzeitige manuelle Rotation beeinflusst wird.

Bei Kindern ist die Beteiligung motorischer Prozesse an mentaler Rotation ebenfalls belegt und scheint zudem auch noch ausgeprägter zu sein als bei Erwachsenen. In einer Studie von Frick, Daum, Walser und Mast (2005) konnte gezeigt werden, dass der Inkompatibilitätseffekt von manueller und mentaler Rotation bei Kindern im Alter von 5 und 8 Jahren deutlich größer ist als der bei Erwachsenen. Funk, Brugger und Wilkening (2005) konnten zeigen, dass Kinder bei mentaler Rotation von Handfotografien stärker von einer kongruenten eigenen Handstellung profitierten als Erwachsene.

Bei der Betrachtung dieser unterschiedlichen Faktoren, die Einfluss auf die mentale Rotationsleistung haben, drängt sich die Frage auf, inwieweit man durch den Faktor der Übung diese Leistung verbessern kann.

2.3 Trainierbarkeit mentaler Rotation

Je familiärer Versuchspersonen mit dem verwendeten Stimulusmaterial sind, desto schneller können sie dieses mental rotieren (siehe Abschnitt 2.2.2). So zeigten z. B. Kail et al. (1980), dass sowohl Erwachsene als auch Kinder längere Reaktionszeiten für unfamiliäre PMA-Figuren (Figuren aus dem primary mental abilities-Test von Thurstone, 1958) als für bekannte Buchstaben aufwiesen. Auch Bethell-Fox und Shepard (1988) wiesen nach, dass die Reaktionszeit bei mentaler Rotation mit der Stimulus-Komplexität zunahm und konnten darüber hinaus zeigen, dass aber mit fortschreitendem Training die Reaktionszeiten unabhängig von der Komplexität des Stimulus-Materials wurden.

Die Trainierbarkeit mentaler Rotation ist das Thema vieler Studien gewesen. Mit erwachsenen Versuchspersonen konnte belegt werden, dass nach einem Training, welches aus Wiederholungen der mentalen Rotationsaufgabe bestand, die Reaktionszeiten der Versuchspersonen abnahmen (z. B. Kail & Park, 1990; Kaushall & Parsons, 1981). Kail und Park zeigten, dass schon 11-Jährige von so einem umfangreichen mentalen Rotationstraining profitieren können und ihre mentale Rotationsgeschwindigkeit nach dem Training etwa sechs mal schneller war als vor dem Training. Allerdings war dieser Trainingseffekt auf die in diesen Studien dargebotenen Buchstabenreize beschränkt und generalisierte nicht auf andere Stimuli. Darüber hinaus gibt es weitere Evidenz, dass durch ein solches mentales Rotationstraining nicht der Prozess der mentalen Rotation selbst beschleunigt wird, sondern dieser einfach durch den Abruf gespeicherten Wissens ersetzt wird. So hatte in der Studie von Heil, Rösler, Link und Bajric (1998) das Training der mentalen Rotation nur einen Effekt auf die in der Übung präsentierten Objekte und dies auch nur, wenn die Objekte mit genau dem selben Rotationswinkel dargeboten wurden wie in den Trainingstrials.

Ein motorisches Training könnte dagegen, wie im Folgenden gezeigt wird, geeignet sein den Prozess der mentalen Rotation zu verbessern.

2.3.1 Zusammenhang zwischen mentaler Rotation und Bewegung

Viele sportwissenschaftliche Untersuchungen zeigen auf, dass physische Fitness generell einen förderlichen Effekt auf die kognitive Leistungsfähigkeit besitzt (für einen Überblick siehe Etnier, Nowell, Landers & Sibley, 2006; oder Etnier, Salazar, Landers, Petruzello, Han & Novell, 1997). So belegen z. B. Newson und Kemps (2008), dass sportlich fitte Erwachsene bessere Leistungen in Tests zu Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis und Verarbeitungsgeschwindigkeit erbringen als Erwachsene, die nicht sportlich aktiv sind. Die Leistung in räumlich-kognitiven Aufgaben wird besonders positiv von sportlicher Aktivität und Bewegung beeinflusst (Campos, Anderson, Barbu Roth, Hubbard, Hertenstein & Witherington, 2000). Ozel, Larue und Molinario (2002) untersuchten in einer quasi-experimentellen Studie den Leistungsunterschied von Athleten und Nicht-Athleten in einer mentalen Rotationsaufgabe und stellten fest, dass die Athleten deutlich bessere Leistungen aufwiesen.

Des Weiteren ist gezeigt worden, dass motorische und kognitive Entwicklung grundlegend miteinander verbunden sind (Diamond, 2000; Rosenbaum, Carlson & Gilmore, 2001) und ähnliche Mechanismen beide Entwicklungen steuern (Paz, Wise & Vadia, 2004). Heil und Jansen (2008) zeigten, dass die Fähigkeit der motorischen Kontrolle ein signifikanter Prädiktor für die Leistung in einem mentalen Rotationstest ist. Häufig ist eine Dysfunktion in der motorischen Entwicklung mit einer Dysfunktion in der kognitiven Entwicklung verbunden und umgekehrt (Gillberg, 2003; Pitcher, Piek & Hay, 2003).

2.3.2 Motorisches Training mentaler Rotation

Obwohl der enge Zusammenhang von Motorik und der Leistung in räumlichen Aufgaben eine bekannte Annahme ist, existieren wenige Studien, die sich mit dem Einfluss eines motorischen Trainings auf die Fähigkeit zu mentaler Rotation befassen. Darüber hinaus sind die in den Studien zu diesem Thema durchgeführten Trainings meist alltagsfern und umfassten keine „wirklich“ motorischen, sportlichen Aufgaben. So untersuchten Wiedenbauer, Schmid und Jansen-Osmann (2007) den Einfluss eines manuellen Rotationstrainings auf mentale Rotation bei Erwachsenen. Vor der mentalen Rotationsaufgabe lernten die Versuchspersonen der Trainingsgruppe mittels Drehung eines Joysticks (parallel zur Bildebene) eine Würfelfigur in die gleiche Orientierung zu rotieren, wie die Standardfigur. Im Vergleich mit der Kontrollgruppe, die kein Training erhielt, war die Kontrollgruppe in dem anschließenden mentalen Rotationstest signifikant schneller und machte auch weniger Fehler. Die Trainingseffekte generalisierten aber nicht auf andere Stimuli. Bei Kindern dagegen war dieses manuelle Rotationstraining nicht objektspezifisch (Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). Dieses Ergebnis ist konform mit der angenommenen engeren Verbindung von manueller und mentaler Rotation bei Kindern (Frick et al., 2005; Funk et al., 2005).

Die erste Studie, die den Effekt eines alltagsnahen motorischen Trainings in Form eines Jongliertrainings untersucht hat, ist die Studie von Jansen, Titze und Heil (in press; siehe nächster Abschnitt).

2.4 Zusammenhang von Jonglieren und mentaler Rotation

Zwischen der motorischen Aufgabe des Jonglierens und der kognitiven Aufgabe der mentalen Rotation bestehen theoretische, sowie auch experimentelle Zusammenhänge.

Auf der theoretischen Ebene weisen beide Aufgaben gleiche Merkmale auf: Beide sind mit kreisförmiger Bewegung verbunden und haben räumliche und zeitliche Komponenten. Bei mentaler Rotation muss ein Objekt entlang einer kreisförmigen Bewegungsbahn gedreht werden, um in die Position eines Vergleichsobjektes gebracht zu werden. Diese Drehung findet analog zu einer externen Rotation kontinuierlich statt und durchläuft wie diese alle Zwischenstufen, d. h. ein Objekt, welches um x° gedreht wird durchläuft z. B. auch den Rotationswinkel $x^\circ/2$ (Cooper, 1976; Cooper und Shepard, 1984). Beim Jonglieren bewegt der Jongleur, während er die Jonglierbälle wirft und fängt, die Hände entlang zyklischer Bewegungsbahnen, (Beek, 1989; Van Santvoord, 1995). Dabei beschreibt die eine Hand die Bewegung mit bestimmter Geschwindigkeit im Uhrzeigersinn, die andere gegen den Uhrzeigersinn, weswegen Post, Daffertshofer und Beek (2000) Jonglieren auch als „*spatial clock*“ bezeichnen. Mentale Rotation wird als verdeckte manuelle Rotation betrachtet (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998), bei der Objekte im oder gegen den Uhrzeigersinn mit einer Rotationsgeschwindigkeit bewegt werden, die z. B. von der Komplexität des Stimulusmaterials (siehe Abschnitt 2.2.2.) abhängt. Die Bewegung der Hände beim Jonglieren lässt sich auch als „gespiegelt“ beschreiben und bei mentaler Rotation wird eine Entscheidung gefordert, ob zwei Objekte identisch oder Spiegelbilder voneinander sind. Die Bewegungen bei mentaler Rotation und beim Jonglieren werden vereinfacht in Abbildung 2, bzw. in Abbildung 3, verdeutlicht.

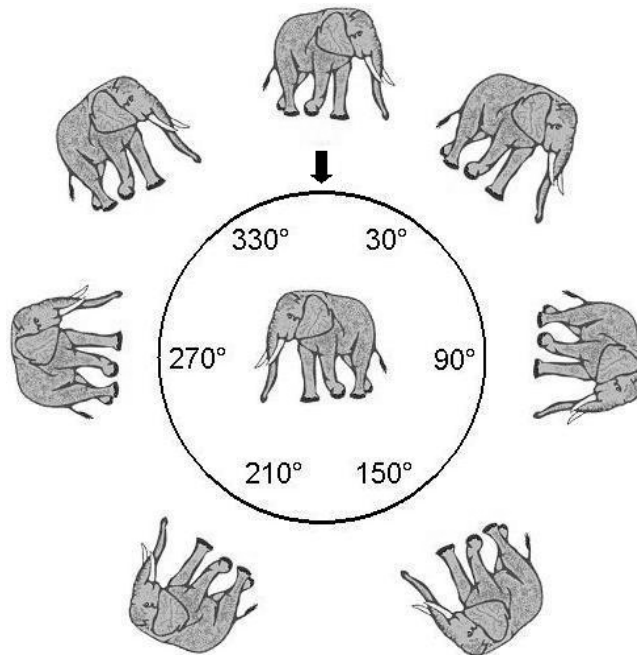


Abbildung 2: Vereinfachtes Modell der Bewegung bei mentaler Rotation. In der Mitte des Kreises ist das Vergleichsobjekt zu sehen, um den Kreis herum mögliche gedrehte (sowie gespiegelte) Varianten. Um zu schauen, ob diese identisch mit dem Vergleichsobjekt oder Spiegelbilder von diesem sind, müssen sie in die aufrechte Position (0°, Pfeil) rotiert und dann mit dem Vergleichsobjekt verglichen werden.

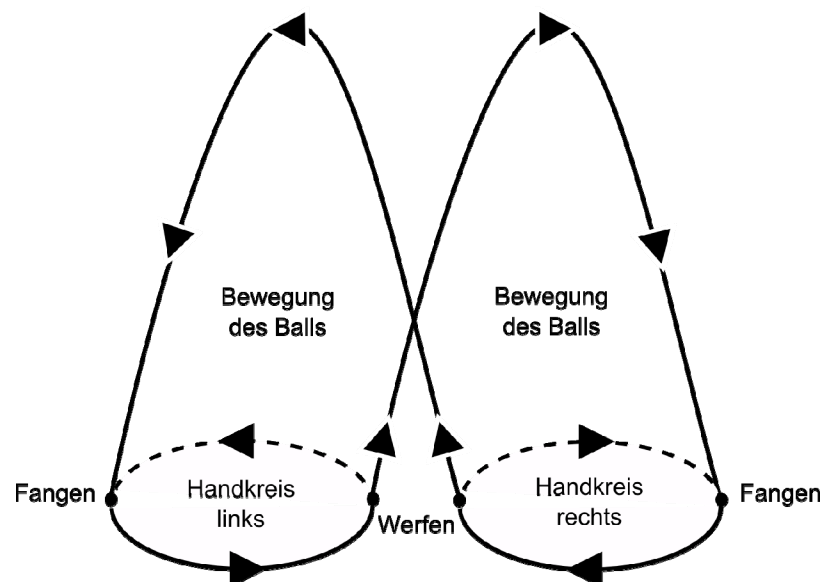


Abbildung 3: Vereinfachtes Modell der Bewegung der Bälle und der Hände beim Jonglieren (nach Post et al., 2000).

Diese theoretischen Überlegungen werden auf experimenteller Ebene unterstützt. Draganski, Gaser, Busch, Schuierer, Bogdahn und May (2004) untersuchten per MRT den Einfluss eines dreimonatigen Jongliertrainings auf die neuronale Plastizität von Erwachsenen. Sie konnten zeigen, dass Versuchspersonen, die ein Jongliertraining erhalten hatten, im Vergleich mit Versuchspersonen ohne Training, eine signifikante bilaterale Ausdehnung der grauen Substanz im intraparietalen Sulcus aufwiesen. Jordan et al. (2001) hatten gezeigt, dass genau dieses Areal bei Aufgaben zu mentaler Rotation aktiv ist.

Einen direkten Zusammenhang von Jonglieren und mentaler Rotation belegt die Studie von Jansen et al. (in press), welche die experimentelle Basis für die vorliegende Arbeit darstellt. In der Studie von Jansen et al. wurde der Effekt eines Jongliertrainings auf die mentale Rotationsleistung bei Erwachsenen untersucht. Es nahmen 46 Erwachsene im Alter von 16 bis 47 Jahren (Durchschnittsalter: 25,76 Jahre) an der Studie teil, davon waren 40 weiblich und sechs männlich. Diese Teilnehmer wurden per Zufall der Trainingsgruppe (EG; 20 Frauen, 3 Männer) oder der Kontrollgruppe (KG; 20 Frauen, 3 Männer) zugewiesen. Keine der Versuchspersonen konnte vor Teilnahme an der Studie jonglieren. Beide Gruppen nahmen an zwei chronometrischen mentalen Rotationstests (Prä- und Posttest) teil, eine individuelle Testung dauerte jeweils etwa 40 Minuten. Als Stimulus-Material wurden 18 perspektivische Zeichnungen dreidimensionaler Figuren verwendet (jeweils aus 10 Würfeln bestehend), die im Aufbau den von Shepard und Metzler (1971), sowie von Jansen-Osmann und Heil (2007b) benutzten Stimuli ähnlich waren. Jeder Test bestand aus 432 Trials, die in vier Blöcken à 108 Trials präsentiert wurden. Die Anzahl der Durchgänge ergab sich aus den Kombinationen von 18 unterschiedlichen Stimuli, Antwortmöglichkeit („identisch“/„gespiegelt“) und Winkeldisparität (0°, 90°, 180°), von denen jede Kombination viermal präsentiert wurde. Zu Beginn des Tests fanden 54 Testdurchgänge statt, die nicht aufgezeichnet wurden.

Zwischen den beiden mentalen Rotationstests lag ein Zeitintervall von drei Monaten, in welchem die Mitglieder der EG einmal wöchentlich für eine halbe Stunde jonglieren übten. Bei der ersten Session bekamen die Versuchspersonen von Stephan Ehlers, einem bekannten deutschen Jongleur, eine Einleitung ins Jonglieren. Das weitere Training folgte seinem Ansatz (Ehlers, 2005). Zwischen den einzelnen Trainings sollten die Versuchspersonen selbständig 40-60 Minuten das Jonglieren üben. Diese individuelle Trainingszeit, sowie die jeweilige Anzahl geschaffter Abwürfe, wurde bei jeder Trainingssession registriert. Die Mitglieder der Kontrollgruppe erhielten während dieser Zeit keinerlei Training.

In die Datenauswertung gingen nur Versuchsdurchgänge mit korrekten Antworten ein und Reaktionszeiten, die mehr als zwei Standardabweichungen über oder unter dem Mittelwert pro Bedingung und Personen lagen, wurden ausgeschlossen. Des Weiteren waren alle Analysen auf „identisch“ Antworten beschränkt, da Winkeldisparität für „gespiegelt“ Antworten nicht einheitlich definiert ist (siehe z. B. Jolicoeur, Regehr, Smith & Smith, 1985).

Als abhängige Variable diente der Differenzwert der Reaktionszeiten zwischen Prä- und Posttest (siehe Wiedenbauer et al., 2007). In der EG wurde darüber hinaus die Jonglierleistung betrachtet. Diese verbesserte sich durch das Training signifikant. In beiden Gruppen fand sich durch das bloße Wiederholen des Tests eine Leistungssteigerung in der mentalen Rotationsaufgabe vom Prätest zum Posttest (siehe Heil et al., 1998). Aber die Versuchspersonen der Trainingsgruppe wiesen einen statistisch signifikant größeren Reaktionszeitgewinn auf als die Mitglieder der Kontrollgruppe. Dieses Ergebnis zeigte deutlich, dass ein Jongliertraining geeignet ist, die mentale Rotationsleistung über einen bloßen Wiederholungs-Effekt hinweg zu verbessern.

2.5 Zentrale Fragestellungen

Alltagsnahe motorische Trainings wurden bisher unter der Fragestellung der Verbesserung mentaler Rotationsleistung nur sehr wenig untersucht. Vor diesem Hintergrund sollten im Zuge dieser Arbeit zunächst die Ergebnisse von Jansen et al. (in press) repliziert und erweitert werden. Demnach beschäftigten sich die ersten beiden Experimente mit der Frage, inwieweit sich die Leistung in einer mentalen Rotationsaufgabe bei Kindern durch ein Jongliertraining verbessern und sich dadurch der angenommene Zusammenhang motorischer und kognitiver Prozesse unterstützen lässt.

Beim dritten und vierten Experiment standen die neuronalen Korrelate mentaler Rotation bei Kindern im Vordergrund.

Einen Überblick über die Experimente gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über die vier Experimente dieser Arbeit

Experiment	Design	Ergebnis
Experiment 1 The influence of juggling on mental rotation performance in children <i>under review</i>	Kinder mentaler Rotationstest prä und post 3D Würfelfiguren EG: 3 Monate Jongliertraining KG: 3 Monate leichtes Krafttraining	Verbesserung der motorischen Leistung als Funktion des Trainings in beiden Gruppen signifikant größerer RZ-Gewinn vom Prä- zum Posttest in der EG im Vergleich zur KG
Experiment 2 The effect of a juggling training on mental rotation of 2D-stimuli <i>submitted</i>	Kinder mentaler Rotationstest prä und post 2D Polygone EG: 3 Monate Jongliertraining KG: 3 Monate leichtes Krafttraining	Verbesserung der motorischen Leistung als Funktion des Trainings in beiden Gruppen kein Unterschied im RZ-Gewinn vom Prä- zum Posttest zwischen der KG und der EG
Experiment 3 Does childrens left hemisphere lateralization during mental rotation depend upon the stimulus material? <i>Journal of Individual Differences, in press</i>	Kinder, Jugendliche und Erwachsene mentaler Rotationstest 2D Tierzeichnungen EEG-Aufzeichnung	Zunahme der RZ mit steigender Winkeldisparität Zunahme der RZ mit sinkendem Alter Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation in allen drei Altersgruppen
Experiment 4 The amplitude modulation during mental rotation is not stimulus specific <i>submitted</i>	Kinder und Erwachsene mentaler Rotationstest 2D PMA-Figuren EEG-Aufzeichnung	Zunahme der RZ mit steigender Winkeldisparität kürzere RZ bei Erwachsenen als bei Kindern Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation in beiden Altersgruppen

3 Experimente

Nachfolgend wird jedes Experiment kurz dargestellt. Genauere Angaben zum Versuchsaufbau, zur statistischen Auswertung und den Ergebnissen finden sich in den Einzelarbeiten im Anhang. Zuerst werden die beiden Studien zur Verbesserung der mentalen Rotationsleistung durch ein Jongliertraining berichtet, darauf folgend werden die Experimente zu den neuropsychologischen Grundlagen mentaler Rotation bei Kindern dargestellt.

3.1 Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotationsleistung bei Kindern

Die in den beiden nachfolgenden Abschnitten präsentierten Studien befassen sich mit dem Einfluss eines Jongliertrainings auf die Leistung in einem mentalen Rotationstest bei Kindern.

3.1.1 Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotation mit 3D Stimuli bei Kindern

Im ersten Experiment sollten die Ergebnisse von Jansen, Titze und Heil (in press) mit Kindern als Versuchspersonen repliziert werden. Darüber hinaus sollte getestet werden, ob die Verbesserung in der mentalen Rotationsleistung spezifisch für ein Jongliertraining ist oder sich auf eine allgemeine Verbesserung in der motorischen Leitungsfähigkeit zurückführen lässt.

Insgesamt 50 Mädchen im Alter von 6 bis 14 Jahren nahmen an dieser Studie teil, per Zufall wurden sie der Experimentalgruppe (EG, Jongliertraining) oder der Kontrollgruppe (KG, Krafttraining) zugeordnet. Zu Beginn (Prätest) und am Ende (Posttest) der Untersuchung wurde ein mentaler Rotationstest mit Würfelfiguren als Reizmaterial (vgl. Jansen, Titze & Heil, in press) durchgeführt. Erhoben wurde die

Verbesserung in der mentalen Rotationsleistung als Reaktionszeitdifferenz von Prä- und Posttest. Zwischen den beiden Tests lag ein Zeitintervall von 3 Monaten. In dieser Zeit erhielten die Kinder der Experimentalgruppe zweimal wöchentlich für 30 Minuten ein Jongliertraining. Dieses Training folgte dem Ansatz von Stephan Ehlers, einem bekannten deutschen Jongleur (Ehlers, 2005). In jeder Übungsstunde wurde die Anzahl erfolgreicher Abwürfe registriert. Die Kinder der Kontrollgruppe erhielten in derselben Zeit ein mildes Krafttraining mit Thera-Bändern. In dieser Gruppe wurde regelmäßig die Anzahl der geschafften Kniebeugen erhoben.

Sowohl in der Jonglier- als auch in der Krafttrainingsgruppe zeigten sich Verbesserungen der motorischen Leistungen als Funktion des Trainings; die Kinder in der Jongliergruppe schafften signifikant mehr Abwürfe, die Kinder in der Krafttrainingsgruppe mehr Kniebeugen.

Beide Gruppen zeigten nach dem Training auch eine Leistungsverbesserung in der mentalen Rotationsaufgabe in Form kürzerer Reaktionszeiten. Hierbei war der RZ-Trainingsgewinn in der Jongliergruppe signifikant größer als der in der Krafttrainingsgruppe. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Jansen et al. (in press) konnte folglich belegt werden, dass auch Kinder von einem Jongliertraining zur Verbesserung ihrer mentalen Rotationsleistung profitieren, siehe Abbildung 4. Darüber hinaus legen die Ergebnisse dieser Studie nahe, dass die Leistungssteigerung spezifisch für ein Jongliertraining ist und über die Verbesserung durch ein anderes motorisches Training ohne räumliche Komponente hinausgeht.

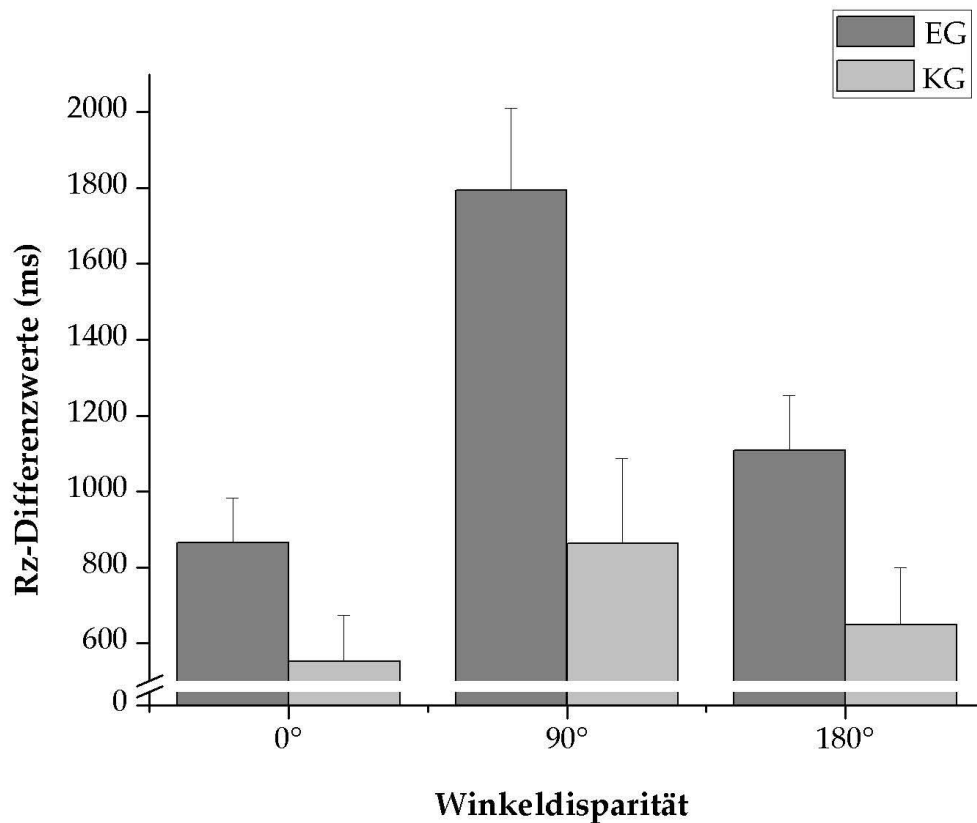


Abbildung 4: Differenz der Reaktionszeiten im Prätest und Posttest im ersten Experiment. Ein höherer Wert gibt einen stärkeren Reaktionszeitgewinn an. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler dar.

3.1.2 Der Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotation mit 2D Stimuli bei Kindern

Um zu untersuchen ob ein Jongliertraining, welches dreidimensional ist, auch einen Effekt auf die mentale Rotation weniger komplexer Stimuli hat, wurden im zweiten Experiment statt dreidimensionaler Würfelfiguren zweidimensionale Polygone als Reize verwendet.

Insgesamt nahmen 50 Kinder (38 Jungen, 12 Mädchen) im Alter von 10 und 11 Jahren teil. Bei dieser Stichprobengröße und einem gewünschten $\alpha = 0,10$ (gerichtete

Hypothese), ließ sich ein Effekt der Größe $f = 0,24$ mit der Wahrscheinlichkeit $1 - \beta = 0,95$ entdecken.

Der Ablauf des Experiments war der gleiche wie im ersten Experiment (siehe oben). Auch in dieser Studie verbesserte sich die Leistung im Jonglieren, bzw. in den Kraftübungen als Folge des Trainings. Ebenfalls zeigte sich eine Verkürzung der Reaktionszeiten im Post- im Vergleich zum Prätest. Allerdings zeigte sich kein Unterschied im Trainingsgewinn zwischen der Jonglier- und der Krafttrainingsgruppe, siehe Abbildung 5.

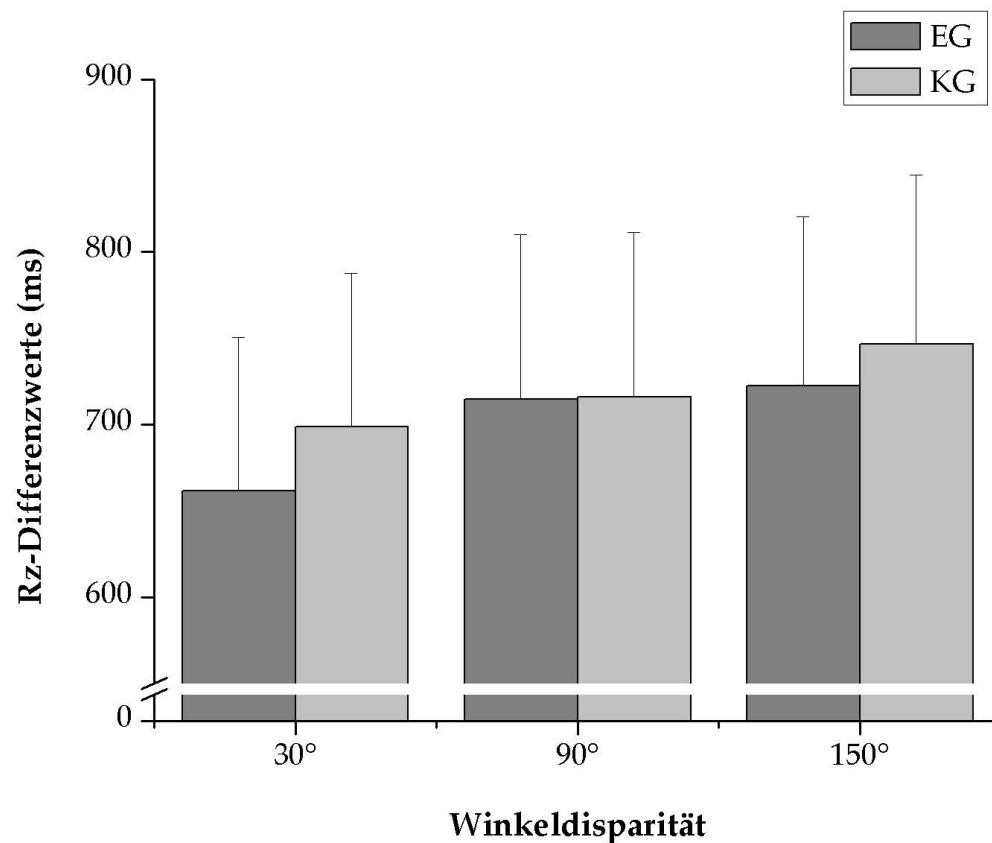


Abbildung 5: Differenz der Reaktionszeiten im Prätest und Posttest im zweiten Experiment. Ein höherer Wert gibt einen stärkeren Reaktionszeitgewinn an. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler dar.

Auf Grund der im ersten Experiment gefundenen Trainingseffekte auf der Verhaltensebene wurde parallel zur Durchführung des zweiten Experimentes die dritte Studie geplant und umgesetzt. Diese sollte die Basis liefern, um die neuronale Ebene der Trainingseffekte zu untersuchen.

3.2 Neuropsychologische Grundlagen mentaler Rotation bei Kindern

Die neurophysiologischen Grundlagen mentaler Rotation bei Kindern sind das Thema der in den folgenden Abschnitten präsentierten Studien. In beiden Experimenten wurde das EEG über fünf Elektroden abgeleitet (Fz, Cz, Pz, P3 und P4; nach Jasper, 1958).

3.2.1 Der Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern

Wie schon in Abschnitt 2.1.2.1 berichtet, ist die Befundlage zu EEG-Daten bei mentaler Rotation bei Kindern nicht sehr umfangreich. Die einzigen Studien, die den bei Erwachsenen gefundenen Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern zeigen, sind die Studien von Heil und Jansen-Osmann (2007) und Jansen-Osmann und Heil (2007a), die allerdings Buchstaben als Stimulus-Material verwendet haben. Da die Vertrautheit einer Versuchsperson mit Buchstaben und der damit verbundenen Leistung in Aufgaben, die Buchstaben als Reizmaterial benutzen, aber in Abhängigkeit vom Alter und somit der Lese- und Schreibfähigkeit variiert (z. B. Bowman & Treiman, 2002; Burgund, Schlaggar & Petersen, 2006) sind Buchstaben ungeeignet, um Effekte bei Kindern und bei Erwachsenen zu vergleichen. Des Weiteren wird bei mentalen Rotationsaufgaben mit Buchstaben immer nur ein Reiz präsentiert und diese Art der Aufgabe weist schon in den Reaktionszeiten Unterschiede zu mentalen Rotationstests auf, in denen zwei visuell dargebotene Reize verglichen werden müssen (siehe Abschnitt 2.2.2).

Aus diesem Grund wurden in diesem Experiment (Experiment 3) farbige Tierzeichnungen (aus Rossion & Pourtois, 2004) als Reize verwendet. Jede Kombination aus Zeichnung (12 verschiedene Tiere), Antwortmöglichkeit („identisch“/„gespiegelt“) und Winkeldisparität (30° , 90° , 150°) wurde viermal präsentiert. Dies ergab eine Gesamtanzahl von 288 Trials. Zu Beginn des Experiments fanden 48 unaufgezeichnete Test-Trials statt. Die Testung einer Versuchsperson dauerte ca. 1,5 Stunden. Insgesamt nahmen 28 jüngere Kinder (Durchschnittsalter: 7,7 Jahre), 28 ältere Kinder (Durchschnittsalter: 11,6 Jahre) und 28 Erwachsene (Durchschnittsalter: 24,2 Jahre) an dem Experiment teil.

Als abhängige Variablen wurden die Reaktionszeit, sowie die gemittelte Amplitude zwischen 400 und 800 ms nach Erscheinen der Reize betrachtet.

Die Reaktionszeit nahm mit steigender Winkeldisparität zu und diente somit als Indikator des Prozesses der mentalen Rotation. Des Weiteren nahm die Reaktionszeit mit dem Alter der Versuchspersonen ab, siehe Abbildung 6.

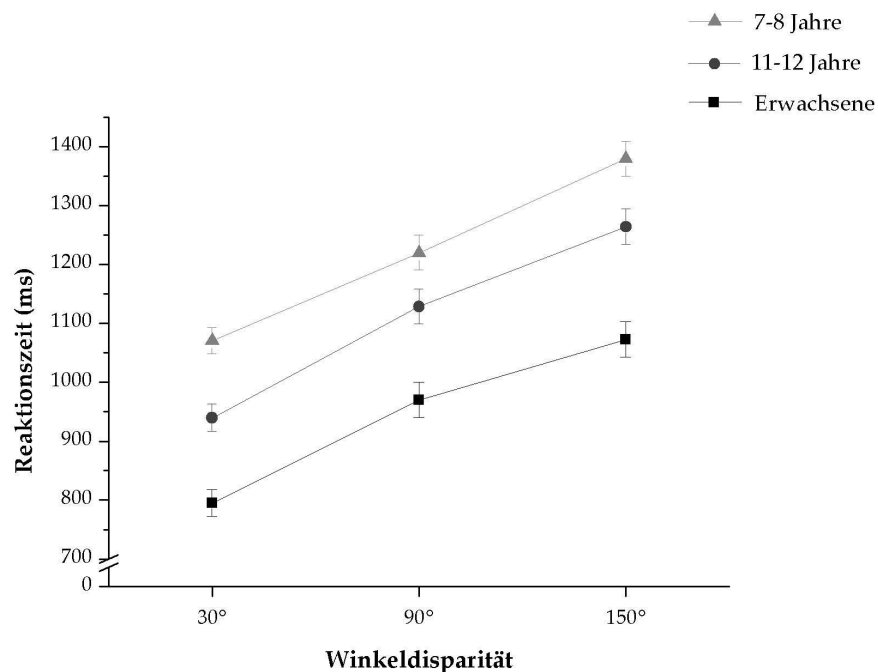


Abbildung 6: Reaktionszeiten als Funktion der Winkeldisparität für die drei Altersgruppen. Die Fehlerbalken stellen die Standardfehler dar.

An allen fünf Elektroden zeigte sich ein signifikanter Amplituden-Effekt der Winkeldisparität. Dieser war an den parietalen Elektroden am deutlichsten und trat in allen drei Altersgruppen auf, siehe Abbildung 7. Es konnte folglich gezeigt werden, dass der bei erwachsenen Versuchspersonen bekannte Amplitudeneffekt mentaler Rotation auch bei Kindern und Jugendlichen zu finden ist.¹

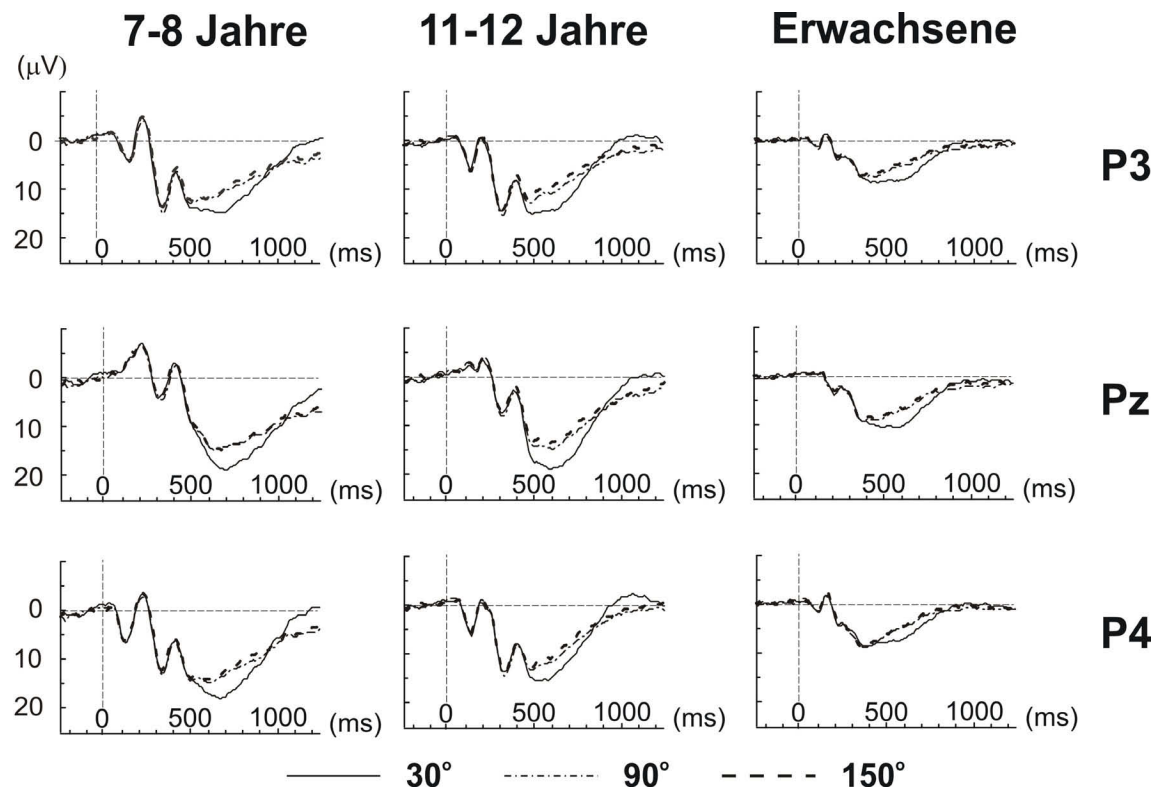


Abbildung 7: Ereigniskorrelierte Potentiale an den parietalen Elektroden als Funktion der Winkeldisparität in den drei Altersgruppen. Stimuluspräsentation war bei 0 ms, Negativität ist nach oben aufgetragen.

¹ Im entsprechenden Paper werden zusätzlich die Lateralisierungsunterschiede bei der Verwendung von Buchstaben- und Tierreizen diskutiert.

3.2.2 Der Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern ist nicht stimulusspezifisch

Um einerseits den im dritten Experiment gefundenen Amplitudeneffekt mentaler Rotation bei Kindern zu replizieren und andererseits um zu überprüfen, ob sich dieser auch bei komplexerem Stimulus-Material finden lässt, wurde das vierte Experiment durchgeführt. Es nahmen 16 Kinder (8 Jungen, 8 Mädchen; Durchschnittsalter: 7,8 Jahre) und 30 Erwachsene (15 Männer, 15 Frauen; Durchschnittsalter 24,7 Jahre) an der Studie teil.² Um die Reizkomplexität zu erhöhen wurden PMA-Figuren als Stimulus-Material verwendet. Jede Kombination aus Zeichnung (16 verschiedene PMA-Symbole), Antwortmöglichkeit („identisch“/„gespiegelt“) und Winkeldisparität (30°, 90°, 150°) wurde viermal präsentiert. Dies ergab eine Gesamtanzahl von 384 Trials. Zu Beginn des Experiments fanden 24 unaufgezeichnete Test-Trials statt. Die Testung einer Versuchsperson dauerte ca. 2 Stunden.

Die Reaktionszeit, sowie die gemittelte Amplitude zwischen 500 und 800 ms nach Erscheinen der Reize wurden als abhängige Variablen betrachtet. Die Analyse der Reaktionszeit ergab in beiden Altersgruppen einen Reaktionszeitanstieg mit zunehmender Winkeldisparität. Dadurch wurde gezeigt, dass in beiden Altersgruppen die Aufgabe durch mentale Rotation gelöst wurde. Die Reaktionszeiten der Erwachsenen waren signifikant kürzer als die der Kinder. Auch bei den ERP-Effekten ließen sich die Ergebnisse aus Experiment 3 replizieren; der parietale Amplitudeneffekt der abnehmenden Positivierung bei steigender Winkeldisparität wurde bei Erwachsenen und Kindern auch mit komplexeren Reizen als Stimulus-Material gefunden, siehe Tabelle 2.

² Da im entsprechenden Paper der Fokus auf methodische Grundlagen gerichtet und zusätzlich Trainingseffekte diskutiert wurden, welche aber in der Kindergruppe nicht eindeutig interpretierbar waren, wurden die Kinderdaten in dem Paper nicht berichtet. Die genauen statistischen Ergebnisse können beim Autor erfragt werden.

Tabelle 2: Reaktionszeiten und Durchschnittsamplituden für die drei Rotationswinkel bei Kindern und Erwachsenen.

		RZ in ms	Durchschnittsamplitude in μV gemittelt über P3, Pz, P4
Kinder	30°	2315	10,88
	90°	2799	10,65
	150°	3209	9,07
Erwachsene	30°	1172	4,07
	90°	1430	1,94
	150°	1721	0,87

4 Allgemeine Diskussion

In den ersten beiden Experimenten dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich in einer mentalen Rotationsaufgabe Reaktionszeitgewinne in Folge eines Jongliertrainings finden. Diese sind spezifisch für das Jongliertraining, wenn man dreidimensionale Stimuli nutzt. Wenn man aber die Komplexität der verwendeten Stimuli reduziert und zweidimensionale Polygone als Reizmaterial nutzt, lassen sich keine spezifischen Trainingseffekte mehr nachweisen.

Im dritten und vierten Experiment ließ sich belegen, dass auch bei Kindern im EEG Amplitudeneffekte auftreten, die mit der Winkeldisparität bei mentaler Rotation korrelieren. Diese rotationsabhängige Amplitudenmodulation zeigt sich sowohl bei einfachen als auch bei komplexen zweidimensionalen Stimuli.

Nachfolgend soll zunächst erläutert werden, inwieweit die Ergebnisse der ersten beiden Studien zur Unterstützung des angenommenen Zusammenhangs motorischer und kognitiver Prozesse beitragen können. Zweitens soll auf die Amplitudenmodulation mentaler Rotation bei Kindern eingegangen werden. Abschließend werden die zentralen Thesen dieser Arbeit formuliert und ein Ausblick auf sich anschließende experimentelle Fragestellungen gegeben.

4.1 Zusammenhang motorischer und kognitiver Prozesse

Im ersten Teil dieser Arbeit konnte der Zusammenhang zwischen Jonglieren und mentaler Rotationsleistung, und dementsprechend zwischen motorischer und kognitiver Leistung, aufgezeigt werden. Folglich wurde die „allgemein bekannte“ und von Kognitionspsychologen angenommene Verknüpfung zwischen motorischen und kognitiven Prozessen (siehe Abschnitt 2.2.5) bestätigt. Auch im Bereich der Sportwissenschaften haben die Ergebnisse dieser Experimente bedeutende

Implikationen. Die Studien unterstützen die These der Sportwissenschaftler, dass ein sportliches Training nicht nur motorischen, sondern auch kognitiven Leistungszuwachs bringt (siehe Abschnitt 2.3.1). Dies wiederum liefert ein Argument für die Forderung nach mehr Sportstunden im schulischen Unterricht.

Allerdings war der im zweiten Experiment gefundene Trainingseffekt nicht, so wie im ersten Experiment, spezifisch für ein Jongliertraining. Der Unterschied zwischen diesen beiden Studien lag in der Art des in der mentalen Rotationsaufgabe verwendeten Reizmaterials. Während im ersten Experiment, analog zur Studie von Jansen et al. (in press), dreidimensionale Würfelfiguren als Stimuli verwendet wurden, bestanden die Stimuli im zweiten Experiment aus zweidimensionalen Polygonen. Das Jongliertraining, als ein Training, welches die dreidimensionale räumliche Koordination der Hände fordert, zeigte also nur in einer mentalen Rotationsaufgabe einen Effekt, welche auch dreidimensionale Stimuli verwendete. Betrachtet man die empirische Datenlage auf diesen Zusammenhang hin, so zeigt sich, dass in allen Studien, die einen Zusammenhang zwischen zweidimensionaler Bewegung und Rotationsleistung gefunden haben, auch zweidimensionale Stimuli benutzt wurden (Frick et al., 2005; Wexler et al., 1998; Wiedenbauer et al., 2007; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). In allen Studien, die dagegen eine dreidimensionale Bewegung untersucht haben, war auch das in der Rotationsaufgabe eingesetzte Stimulusmaterial dreidimensional (Jansen et al., in press; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Es sieht so aus, als müssten Bewegung und Reizmaterial die gleichen Dimensionen besitzen, damit sich ein Effekt der Motorik findet.

In der Ergonomie-Forschung ist es eine bekannte Tatsache, dass beim Entwurf von Equipment, welches dazu dienen soll, die menschliche Leistung zu steigern, der räumliche Zusammenhang zwischen visuellem Stimulus und Antwortgabe eine bedeutende Rolle spielt. Ein Beispiel für die Bedeutung räumlicher Kompatibilität gibt die Studie von Bayerl, Millen & Lewis (1988), die zeigt, dass die

Antwortgeschwindigkeit durch eine räumlich konsistente Anordnung von Tasten auf einer Tastatur und der korrespondierenden Labels dieser Tasten auf dem Bildschirm erhöht wird. Auch spätere Studien, welche die Anordnung von Herdplatten-Knöpfen (Hsu & Peng, 1993) oder den Gebrauch von Schalthebeln zur Antwort auf diskrete Stimuli (Chua, Weeks, Ricker & Poon, 2001) untersuchten, zeigten die Signifikanz räumlich kompatibler Anordnungen für die Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit. Die Studie von Koch und Jolicoeur (2007) zeigt, dass Kompatibilitäts-Effekte auch über Aufgaben hinweg vorhanden sind.

Umiltà und Nicoletti (1990) erklären den Einfluss der räumlichen Kompatibilität auf Reaktionszeiten damit, dass bei nicht-kompatibler Anordnung ein weiterer kognitiver Schritt notwendig ist, um die räumliche Position der Stimuli und der Antworten in Übereinstimmung zu bringen. Diese zusätzliche Transformationsleistung verlängert die Reaktionszeiten. Die gleiche Erklärung ließe sich auch auf die in den ersten beiden Experimenten gefundenen Ergebnisse anwenden. Lernen die Versuchspersonen eine dreidimensionale Bewegung, dann bilden sie ein mentales Konzept dieser Bewegung, welches bei der mentalen Rotation mit dreidimensionalen Stimuli abgerufen wird und die Reaktionszeit beschleunigt. Wird dagegen statt einer dreidimensionalen eine zweidimensionale Rotation gefordert, stimmt die mentale Bewegungsrepräsentation nicht mehr, sie muss umgesetzt werden und dieser zusätzliche kognitive Schritt verlängert die Reaktionszeiten. Die Existenz eines neurophysiologischen Unterschiedes in der Wahrnehmung von dreidimensionalen und zweidimensionalen Stimuli zeigen z. B. die Studien von Merboldt, Baudewig, Treue und Frahm (2002) und von Diwadkar, Carpenter und Just (2000).

4.2 Amplitudenmodulation mentaler Rotation bei Kindern

Neben den Studien von Heil und Jansen-Osmann (2007) und Jansen-Osmann und Heil (2007a), welche aber Buchstaben als Stimulus-Material verwendeten, existieren bisher keine Untersuchungen, die sich mit den elektrophysiologischen Korrelaten mentaler Rotation bei Kindern beschäftigt haben. Somit wurde im zweiten Teil dieser Arbeit erstmals belegt, dass der von Erwachsenen bekannte Amplitudeneffekt zunehmender Negativierung bei steigender Winkeldisparität auch bei Kindern zu zeigen ist. Dieser Effekt ist sowohl bei einfachen Reizen (Tierbilder) als auch bei komplexen Reizen (PMA-Figuren) vorhanden, was dafür spricht, dass er generell durch den Prozess der mentalen Rotation hervorgerufen wird.

Allerdings wird der Effekt bei den Kindern bei Benutzung der komplexen Reize nur knapp signifikant. Dies macht deutlich, dass sich der Effekt bei Kindern mit zunehmender Komplexität der Reize verringert. Es könnte sein, dass dies durch Überlagerung durch einen generellen Schwierigkeitseffekt (Johnson, 1986), durch Unsicherheit in der Antwortwahl bei komplexeren Stimuli (Paller, Kutas & Mayes, 1987; Paller, McCarthy & Wood, 1988; Ruchkin & Sutton, 1978) oder durch die Anwendung anderer Lösungsstrategien verursacht wird.

Folgende zentrale Thesen lassen sich also aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableiten.

4.3 Zentrale Thesen

1. *Die Leistung in einer mentalen Rotationsaufgabe lässt sich durch ein Jongliertraining verbessern.*
2. *Damit eine motorische Handlung einen Effekt auf die mentale Rotationsleistung hat, müssen die Bewegung und die in der Rotationsaufgabe eingesetzten Stimuli die gleichen Dimensionen besitzen.*
3. *Auch bei Kindern findet sich eine Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation.*
4. *Der Amplitudeneffekt ist bei der Verwendung komplexerer Reize geringer.*

5 Ausblick

Auf der Basis dieser Arbeit lassen sich eine Reihe von Fragen formulieren, wie zum einen der Einfluss eines motorischen Trainings auf die Leistung in mentalen Rotationsaufgaben und zum anderen die Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation weiter untersucht werden kann, und wie darüber hinaus die neuronalen Plastizitätseffekte durch ein solches Training betrachtet werden können. Einige dieser Fragestellungen sollen abschließend kurz umrissen werden.

5.1 Einfluss motorischer Trainings auf die mentale Rotationsleistung

Im Folgenden wird ein Ausblick auf Studien gegeben, welche die Befunde der ersten beiden Experimente dieser Arbeit ausweiten sollen.

5.1.1 Verwendung anderer Stimuli

Wie in Abschnitt 4.1 zusammengefasst, scheint sich ein dreidimensionales Jongliertraining nur spezifisch auf die Reaktionszeit in mentalen Rotationsaufgaben auszuwirken, wenn die zu rotierenden Stimuli dreidimensional sind. Darüber hinaus sieht es so aus, als müssten Bewegung und Reizmaterial die gleichen Dimensionen besitzen, damit sich ein Effekt der Motorik findet.

Um für diese These empirische Evidenz zu erhalten, könnte man untersuchen, wie sich das Training einer zweidimensionalen Bewegung auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit mit dreidimensionalen Stimuli auswirkt. Des Weiteren wäre es interessant zu schauen, ob ein Jongliertraining nur einen Effekt bei der Verwendung komplizierter dreidimensionaler Würfelfiguren hat, oder ob auch die Rotation anderer dreidimensionaler Objekte beschleunigt werden kann.

5.1.2 Verwendung anderer motorischer Trainings

Ein Jongliertraining als eine Aufgabe, welche die kreisförmige Bewegung der Hände fordert, hat Einfluss auf die mentale Rotationsleistung. Daraus ergibt sich die Frage, ob auch motorische Aufgaben, die z. B. eine kreisförmige Bewegung der Arme oder des ganzen Körpers fordern, diesen Einfluss haben. So wäre es interessant zu untersuchen, welchen Effekt z. B. das Training von Brustschwimmen oder Diskuswerfen auf die mentale Rotationsgeschwindigkeit hat. Des Weiteren ist eine spannende Fragestellung, ob die visuelle Wahrnehmung der motorischen Rotation Voraussetzung ist, um einen Trainingseffekt hervorzurufen. Die Studie von Wohlschläger und Wohlschläger (1998) legt nahe, dass es nicht nötig ist, die Bewegung visuell wahrzunehmen. Dort zeigte sich eine Verbindung zwischen motorischer und manueller Rotation, obwohl die Versuchspersonen ihre Handbewegung nicht sehen konnten.

5.1.3 Einfluss eines Jongliertrainings auf andere kognitive Fähigkeiten

Wenn ein Jongliertraining Einfluss auf die Leistung in einer räumlichen Aufgabe hat liegt es nahe zu vermuten, dass auch andere kognitive Fähigkeiten von einem solchen Training beeinflusst werden. Nach Casey, Nuttal und Pezaris (1997) gibt es einen Zusammenhang zwischen der Leistung in mentalen Rotationstests und mathematischen Fähigkeiten. Und Nilges (2000) zeigte sechs räumliche Fertigkeiten auf, die physikalisches und mathematisches Lernen beeinflussten. Dementsprechend liegt die Vermutung nah, dass ein Jongliertraining auch die mathematischen Leistungen steigern könnte.

5.2 Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler

Rotation bei Kindern

Im Folgenden werden Überlegungen angestellt, wie die im dritten und vierten Experiment der vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnisse näher untersucht und erweitert werden können.

5.2.1 Untersuchung anderer Stimuli

Um Evidenz zu liefern, dass der Effekt der Amplitudenmodulation in Abhängigkeit von der Winkeldisparität bei Kindern ein generelles Korrelat mentaler Rotation ist, sollten weitere unterschiedliche Stimuli untersucht werden. Besonders interessant, auch im Hinblick auf die Verknüpfung der in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsstränge, wäre die Betrachtung der Amplitudeneffekte bei Verwendung dreidimensionaler Stimuli. Allerdings zeigen sich schon bei Erwachsenen nur geringe und verschwommene Effekte im EEG bei mentaler Rotation mit 3D-Reizen (Roberts & Bell, 2002; Wegesin, 1998). Da bei Kindern die interindividuelle Variabilität im EEG größer ist als bei Erwachsenen (Benninger, Matthis & Scheffner, 1984) ist zu erwarten, dass bei diesen noch schwieriger Effekte bei komplexeren Reizen, wie z. B. 3D-Figuren, nachzuweisen sind. So zeigte sich schon im vierten Experiment der vorliegenden Arbeit, dass der Amplitudeneffekt bei Kindern nur knapp signifikant war, wenn komplexe zweidimensionale Reize benutzt wurden. Offensichtlich verringert sich der Amplitudeneffekt bei Kindern mit zunehmender Schwierigkeit der Reize bzw. wird von einem generellen Schwierigkeitseffekt überlagert (Johnson, 1986). Dies könnte z. B. durch die zunehmende Unsicherheit bei der Entscheidung bei mentaler Rotation mit komplexen Stimuli bedingt sein (Paller et al., 1987; Paller et al., 1988; Ruchkin & Sutton, 1978). Dementsprechend müsste in weiteren Studien diese Faktoren einzeln betrachtet werden.

5.2.2 Untersuchung der verwendeten Strategien

Des Weiteren sollten die Strategien, welche die Kinder bei der Lösung der mentalen Rotationsaufgaben angewendet haben, betrachtet werden. Es wäre möglich, dass sich deswegen unterschiedlich starke Amplitudeneffekte zeigen, da die Kinder in der Rotationsaufgabe mit Tieren in der Lage waren, diese holistisch zu drehen, sie die PMA-Reize aber nur analytisch verarbeiten konnten (Corballis, 1997; Glück & Fitting, 2003). Eine Amplitudenmodulation in Abhängigkeit von verwendeten Strategien wird in diversen Studien aufgezeigt (Fabiani, Karis & Donchin, 1990; Goode, Goddard & Pascual-Leone, 2002; Mercure, Dick & Johnson, 2008). Eine Untersuchung der eingesetzten Strategien ließe sich durch introspektive Berichte (z. B. Cochran & Wheatley, 1989; Schultz, 1991), Reaktionszeitanalysen (z. B. Bethell-Fox & Shepard, 1988; Blought & Slavin, 1987), Blickbewegungsuntersuchungen (z. B. Deffner, 1985; Just & Carpenter, 1976, 1985) oder mittels Item-Response-Modellen (Glück et al., 2002) realisieren.

5.3 Betrachtung neuronaler Plastizitätseffekte beim Jonglieren

Final sollten die beiden Forschungsstränge zum Einfluss eines Jongliertrainings auf die mentale Rotationsleistung und zu den EKP-Effekten bei mentaler Rotation bei Kindern verbunden werden. So sollte vor und nach dem Jongliertraining ein mentaler Rotationstest mit EEG-Erhebung durchgeführt werden. Dabei ergibt sich aber die Schwierigkeit der Auswahl des „richtigen“ Reizmaterials. Um die Verhaltenseffekte nach einem Jongliertraining aufzeigen zu können muss man dreidimensionale Reize verwenden. Um dagegen die EKP-Korrelate mentaler Rotation bei Kindern nachzuweisen, verwendet man am besten möglich einfaches, zweidimensionales Reizmaterial.

Folglich ist die Frage neurophysiologischer Veränderungen in einer mentalen Rotationsaufgabe nach einem Jongliertraining bei Kindern wohl nicht mittels EEG beantwortbar. Eine Möglichkeit wäre es sich zuerst auf erwachsene Versuchspersonen zu beschränken. Bei diesen zeigen sich auf Verhaltensebene Reaktionszeitgewinne durch ein Jongliertraining (Jansen, Titze & Heil, in press) und die Amplitudenmodulation als Korrelat mentaler Rotation lässt sich eher zeigen als bei Kindern (siehe Abschnitt 2.1.2.1 und Abschnitt 5.2.1). Zur Untersuchung von Kindern könnte man andere bildgebende Verfahren nutzen, um die neuronalen Plastizitätseffekte durch ein motorisches Training sichtbar zu machen. So zeigten z. B. Draganski et al. (2004) mit Hilfe von MRT, eine bilaterale Zunahme der grauen Substanz im intraparietalen Sulcus nach einem Jongliertraining.

6 Literatur

- Alivisatos, B. & Petrides, M. (1997). Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, 35, 111-118.
- Alyman, C. & Peters, M. (1993). Performance of male and female children, adolescents and adults on spatial tasks that involve everyday objects and settings. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 47, 730-747.
- Bayerl, J. P., Millen, D. R. & Lewis, S. H. (1988). Consistent layout of function keys and screen labels speeds user responses. *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, 344-346.
- Beek, P. J. (1989). Timing and phase locking in cascade juggling. *Ecological Psychology*, 1, 55-96.
- Benninger, C., Matthis, P. & Scheffner, D. (1984). Eeg Development of Healthy Boys and Girls - Results of a Longitudinal-Study. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 57, 1-12.
- 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.
- Blough, P. M. & Slavin, L. K. (1987). Reaction time assessments of gender differences in visual-spatial performance. *Perception and Psychophysics*, 41, 276-281.
- Booth, J. R., MacWhinney, B., Thulborn, K. R., Sacco, K., Voyvodic, J. & Feldman, H. M. (1999). Functional organization of activation patterns in children: Whole brain fMRI imaging during three different cognitive tasks. *Progress in Neuro Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 23, 669-682.
- Bowman, M., & Treiman, R. (2002). Relating print and speech: The effects of letter names and word position on reading and spelling performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 305-340.

- Burgund, E. D., Schlaggar, B. L. & Petersen, S. E. (2006). Development of letter-specific processing: The effect of reading ability. *Acta Psychologica*, 122, 99-108.
- Campos, J. J., Anderson, D. I., Barbu Roth, M. A., Hubbard, E. M., Hertenstein, M. J. & Witherington, D. (2000). Travel broadens the mind. *Infancy*, 1, 149-219.
- Casey, M. B., 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.
- Chua, R., Weeks, D. J., Ricker, K. L. & Poon, P. (2001). Influence of operator orientation on relative organizational mapping and spatial compatibility. *Ergonomics*, 44, 751-765.
- Cochran, K. F. & Wheatley, G. H. (1989). Ability and Sex-Related Differences in Cognitive Strategies on Spatial Tasks. *Journal of General Psychology*, 116, 43-55.
- 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: A Journal of Neurology*, 119, 89-100.
- Cohen, W. & Polich, J. (1989). No hemispheric differences for mental rotation of letters or polygons. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27, 25-28.
- Collins, D. W. & Kimura, D. (1997). A large sex difference on a two-dimensional mental rotation task. *Behavioral Neuroscience*, 111, 845-849.
- Contreras, M. J., Pena, D., Rubio, V. J. & Santacreu, J. (in press). On the robustness of solution strategy classifications. Testing the stability of dynamic spatial tasks on a one-year test-retest basis. *Journal of Individual Differences*.
- 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.

-
- Corballis, M. C. & Sergent, J. (1989). Hemispheric specialization for mental rotation. *Cortex*, 25, 15-25.
- Cooper, L. A. (1975). Mental Rotation of Random 2-Dimensional Shapes. *Cognitive Psychology*, 7, 20-43.
- Cooper, L. A. (1976). Demonstration of a mental analog of an external rotation. *Perception and Psychophysics*, 19, 296-302.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (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.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1984). Turning something over in the mind. *Scientific American*, 251, 106-114.
- Courbois, Y. (2000). The role of stimulus axis salience in children's ability to mentally rotate unfamiliar figures. *European Journal of Cognitive Psychology*, 12, 261-269.
- Deffner, G. (1985). Data on solution strategies from eye-movement recordings. In R. Groner, G. McConkie & C. Menz (Eds.), *Eye movements and human information processing* (pp. 309-322). Amsterdam: Elsevier.
- Desrocher, M. E., Smith, M. L. & Taylor, M. J. (1995). Stimulus and sex differences in performance of mental rotation: Evidence from event-related potentials. *Brain and Cognition*, 28, 14-38.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 71, 44-56.
- Ditunno, P. L. & Mann, V. A. (1990). Right hemisphere specialization for mental rotation in normals and brain damaged subjects. *Cortex*, 26, 177-188.
- Diwadkar, V. A., Carpenter, P. A. & Just, M. A. (2000). Collaborative activity

- between parietal and dorso-lateral prefrontal cortex in dynamic spatial working memory revealed by fMRI. *Neuroimage*, 12, 85-99.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U. & May, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427, 311-312.
- Ehlers, S. (2005). *REHORULI - Jonglieren lernen mit Erfolgsgarantie*. Norderstedt: Books on Demand.
- Ekstrom, R. B., French, J. W. & Harman, H. H. (1979). Cognitive factors: Their identification and replication. *Multivariate Behavioral Research Monographs*, 79, 84.
- Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M. & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Reviews*, 52, 119-130.
- Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M. & Nowell, P. (1997). The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19, 249-277.
- Fabiani, M., Karis, D. & Donchin, E. (1990). Effects of mnemonic strategy manipulation in a Von Restorff paradigm. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 75, 22-35.
- Farah, M. J. & Hammond, K. M. (1988). Mental Rotation and Orientation-Invariant Object Recognition - Dissociable Processes. *Cognition*, 29, 29-46.
- 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.
- Gasser, T., Verleger, R., Bacher, P. & Sroka, L. (1988). Development of the EEG of school-age children and adolescents. I. Analysis of band power. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 69, 91-99.
- Geary, D. C., Saults, S. J., Liu, F. & Hoard, M. K. (2000). Sex differences in spatial cognition, computational fluency, and arithmetical reasoning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 337-353.
- Gilger, J. W. & Ho, H.-Z. (1989). Gender differences in adult spatial information processing: Their relationship to pubertal timing, adolescent activities, and sex-typing of personality. *Cognitive Development*, 4, 197-214.
- Gillberg, C. (2003). Deficits in attention, motor control, and perception: a brief review. *Archives of disease in childhood*, 88, 904-910.
- Glück, J. & Fitting, S. (2003). Spatial Strategy Selection: Interesting Incremental Information. *International Journal of Testing*, 3, 293-308.
- Glück, J., Machat, R., Jirasko, M. & Rollett, B. (2002). Training-related changes in solution strategy in a spatial test: An application of item response models. *Learning and Individual Differences*, 13, 1-22.
- Goode, P. E., Goddard, P. H. & Pascual-Leone, J. (2002). Event-related potentials index cognitive style differences during a serial-order recall task. *International Journal of Psychophysiology*, 43, 123-140.
- Hardwick, D. A., McIntyre, C. W. & Pick, H. L. (1976). Content and Manipulation in Cognitive Maps in Children and Adults. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 41, 1-55.
- Harris, I. M., Egan, G. F., Sonkkila, C., Tochon Danguy, H. J., Paxinos, G. & Watson, J. D. G. (2000). Selective right parietal lobe activation during mental rotation: A parametric PET study. *Brain*, 123, 65-73.

- Hausmann, M., Slabbekoorn, D., Van Goozen, S. H. M., Cohen Kettenis, P. T. & Güntürkün, O. (2000). Sex hormones affect spatial abilities during the menstrual cycle. *Behavioral Neuroscience*, 114, 1245-1250.
- Hegarty, M. & Kozhevnikov, M. (1999). Types of visual-spatial representations and mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 91, 684-689.
- Hegarty, M. & Waller, D. (2005). Individual differences in spatial abilities. In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *Handbook of Higher-level Visuospatial Thinking* (pp. 121 - 169). New York: Cambridge University Press.
- Heil, M. (2002). The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 535-545.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F. & Hennighausen, E. (1996). Event-related potentials during mental rotation: Disentangling the contributions of character classification and image transformation. *Journal of Psychophysiology*, 10, 326-335.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F. & Hennighausen, E. (1997). A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 681-692.
- Heil, M. & Jansen, P. (2008). Aspects of code-specific memory development. *Current Psychology*, 27, 162-168.
- Heil, M. & Jansen-Osmann, P. (2007). Children's left parietal brain activation during mental rotation is reliable as well as specific. *Cognitive Development*, 22, 280-288.
- Heil, M. & Jansen-Osmann, P. (2008). Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: Do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 683-689.

-
- 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.
- Heil, M. & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414-422.
- Hsu, S.-H. & Peng, Y. (1993). Control/display relationship of the four-burner stove: a reexamination. *Human Factors*, 35, 745-749.
- Jansen, P., Titze, C. & Heil, M. (in press). The influence of juggling on mental rotation performance. *International Journal of Sport Psychology*.
- Jansen-Osmann, P. & Heil, M. (2007a). Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *Neuroreport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 18, 175-178.
- Jansen-Osmann, P. & Heil, M. (2007b). Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain and Cognition*, 64, 217-227.
- Jasper, H. (1958). The ten twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neuropsychology*, 10, 371-375.
- Johnson, B. W., McKenzie, K. J. & Hamm, J. P. (2002). Cerebral asymmetry for mental rotation: Effects of response hand, handedness and gender. *Neuroreport*, 13, 1929-1932.
- Johnson, R. (1986). A Triarchic Model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, 23, 367-384.
- Jolicoeur, P., Regehr, S., Smith, L. B. J. P. & Smith, G. N. (1985). Mental Rotation of Representations of Two-Dimensional and 3-Dimensional Objects. *Canadian Journal of Psychology-Revue Canadienne De Psychologie*, 39, 100-129.
- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M. & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, 13, 143-152.

- Jordan, K., Wüstenberg, T., Heinze, H.-J., Peters, M. & Jäncke, 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. & 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.
- Kaushall, P. & Parsons, L. M. (1981). Optical information and practice in the discrimination of 3-D mirror-reflected objects. *Perception*, 10, 545-562.
- Kerns, K. A. & Berenbaum, S. A. (1991). Sex differences in spatial ability in children. *Behavior Genetics*, 21, 383-396.
- Koch, I. & Jolicoeur, P. (2007). Orthogonal cross-task compatibility: Abstract spatial coding in dual tasks. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 45-50.
- 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., Thompson, W. L., Wraga, M. & Alpert, N. M. (2001). Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: Distinct neural mechanisms. *Neuroreport*, 12, 2519-2525.
- Linn, M. C. & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.

-
- Marmor, G. S. (1975). Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? *Cognitive Psychology*, 7, 548-559.
- McCormick, C. M. & Teillon, S. M. (2001). Menstrual cycle variation in spatial ability: Relation to salivary cortisol levels. *Hormones and Behavior*, 39, 29-38.
- Merboldt, K. D., Baudewig, J., Treue, S. & Frahm, J. (2002). Functional MRI of self-controlled stereoscopic depth perception. *Neuroreport*, 13, 1721-1725.
- Mercure, E., Dick, F. & Johnson, M. H. (2008). Featural and configural face processing differentially modulate ERP components. *Brain Research*, 1239, 162-170.
- 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.
- Newson, R. S. & Kemps, E. B. (2008). Relationship between fitness and cognitive performance in younger and older adults. *Psychology and Health*, 23, 369-386.
- Nilges, L. (2000). The Role of Spatial Ability in Physical Education and Mathematics. *The Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 71, 29-32.
- Ozel, S., Larue, J. & Molinaro, C. (2002). Relation between sport activity and mental rotation: Comparison of three groups of subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 95, 1141-1154.
- Paller, K. A., Kutas, M. & Mayes, A. R. (1987). Neural correlates of encoding in an incidental learning paradigm. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 67, 360-371.
- Paller, K. A., McCarthy, G. & Wood, C. C. (1988). ERPs predictive of subsequent recall and recognition performance. *Biological Psychology*, 26, 269-276.
- Papanicolaou, A. C., Deutsch, G., Bourbon, W. T., Will, K. W., Loring, D. W. & Eisenberg, H. M. (1987). Convergent evoked potential and cerebral blood flow evidence of task-specific hemispheric differences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66, 515-520.

- Parsons, L. M., Fox, P. T., Downs, J. H., Glass, T., Hirsch, T. B., Martin, C. C. et al. (1995). Use of Implicit Motor Imagery for Visual Shape-Discrimination as Revealed by PET. *Nature*, 375, 54-58.
- Paz, R., Wise, S. P. & Vaadia, E. (2004). Viewing and doing: Similar cortical mechanisms for perceptual and motor learning. *Trends in Neurosciences*, 27, 496-503.
- Pease, A. & Pease, B. (2000). *Warum Männer nicht zuhören und Frauen schlecht einparken*. München: Ullstein Taschenbuch Verlag.
- Peronnet, F. & Farah, M. J. (1989). Mental rotation: An event-related potential study with a validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, 9, 279-288.
- Peters, M., Chisholm, P. & Laeng, B. (1995). Spatial ability, student gender, and academic performance. *Journal of Engineering Education*, 84, 69-73.
- Pitcher, T. M., Piek, J. P. & Hay, D. A. (2003). Fine and gross motor ability in males with ADHD. *Developmental medicine and child neurology*, 45, 525-535.
- Petit, L. S. & Harris, I. M. (2005). Anatomical limitations in mental transformations of body parts. *Visual Cognition*, 12, 737-758.
- 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.
- Post, A. A., Daffertshofer, A. & Beek, P. J. (2000). Principal components in three-ball cascade juggling. *Biological cybernetics*, 82, 143-152.
- 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, J. E. & Bell, M. A. (2003). Two- and three-dimensional mental rotation tasks lead to different parietal laterality for men and women. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 235-246.

-
- Rösler, F., Schumacher, G. & Sojka, B. (1990). What the brain reveals when it thinks: Event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *German Journal of Psychology*, 14, 185-203.
- Rosenbaum, D. A., Carlson, R. A. & Gilmore, R. O. (2001). Acquisition of intellectual and perceptual-motor skills. *Annual review of psychology*, 52, 453-470.
- 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.
- Ruchkin, D. S. & Sutton, S. (1978). Emitted P300 potentials and temporal uncertainty. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 45, 268-277.
- Rugg, M. D. & Coles, M. G. H. (1995). The ERP and cognitive psychology: Conceptual issues. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event related brain potentials and cognition*. (pp. 27-39). London: Oxford University Press.
- Sack, A. T., Lindner, M. & Linden, D. E. J. (2007). Object- and direction-specific interference between manual and mental rotation. *Perception and Psychophysics*, 69, 1435-1449.
- Schultz, K. (1991). The contribution of solution strategy to spatial performance. *Canadian Journal of Psychology*, 45, 474-491.
- Sekiyama, K. (1982). Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. *Perception & Psychophysics*, 32, 89-95.
- Shepard, R. N. & Chipman, S. (1970). Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. *Cognitive Psychology*, 1, 1-17.
- 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.

- Souvignier, E. (2000). *Förderung räumlicher Fähigkeiten: Trainingsstudien mit lernbeeinträchtigten Kindern*. Münster: Waxmann.
- Steiger, J. H. & Yuille, J. C. (1983). Long-term 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.
- Titze, C., Heil, M. & Jansen, P. (2008). Gender differences in the Mental Rotations Test (MRT) are not due to task complexity. *Journal of Individual Differences*, 29, 130-133.
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. Chicago: University of Chicago Press.
- Thurstone, T. G. (1958). *Manual for the SRA primary mental abilities*. Chicago: Science Research Associates.
- Tomasino, B. & Rumiati, R. I. (2004). Effects of strategies on mental rotation and hemispheric lateralization: Neuropsychological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 878-888.
- Umiltà, C. & Nicoletti, R. (1990). Spatial stimulus-response compatibility. In R. W. Proctor & T. G. Reeve (Eds.), *Stimulus-response compatibility: An integrated perspective* (pp. 89-116). North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Van Santvoord, A. A. M. (1995). *Cascade juggling: learning, variability and information*. Unpublished doctoral dissertation, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Voyer, D. & Bryden, M. P. (1990). Gender, level of spatial ability, and lateralization of mental rotation. *Brain and Cognition*, 13, 18-29.
- Wegesin, D. J. (1998). Event-related potentials in homosexual and heterosexual men and women: Sex-dimorphic patterns in verbal asymmetries and mental rotation. *Brain and Cognition*, 36, 73-92.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M. & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.

-
- Wiedenbauer, G. & Jansen-Osmann, P. (2008). Manual training of mental rotation in children. *Learning and Instruction, 18*, 30-41.
- Wiedenbauer, G., Schmid, J. & Jansen-Osmann, P. (2007). Manual training of mental rotation. *European Journal of Cognitive Psychology, 19*, 17-36.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G. & Mulder, L. J. M. (1989). Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology, 26*, 452-467.
- 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.
- Yuille, J. C. & Steiger, J. H. (1982). Nonholistic processing in mental rotation: Some suggestive evidence. *Perception and Psychophysics, 31*, 201-209.

7 Einzelarbeiten

Experiment 1

Lange, L. F., Jansen, P. & Heil, M. The influence of juggling on mental rotation performance in children (manuscript under review).

Experiment 2

Lange, L. F., Jansen, P. & Heil, M. The effect of a juggling training on mental rotation of 2D-stimuli (manuscript submitted for publication).

Experiment 3

Lange, L. F., Heil, M. & Jansen, P. Does childrens left hemisphere lateralization during mental rotation depend upon the stimulus material? (in press)

Experiment 4

Lange, L. F., Heil, M. & Jansen, P. The amplitude modulation during mental rotation is not stimulus specific (manuscript submitted for publication).

Running head: Mental rotation influenced by juggling

The influence of juggling on mental rotation performance in children

Léonie F. Lange¹, Petra Jansen², & Martin Heil¹

¹ Institute of Experimental Psychology, Duesseldorf

² Institute of Sport Science, University of Regensburg

Corresponding author:

Léonie F. Lange,

Institute of Experimental Psychology,

Heinrich-Heine-University, 40225 Düsseldorf, Germany.

Tel.: +49-211-811-4568

Fax: +49-211-811-3490

Email: LeonieF.Lange@uni-duesseldorf.de

Key words: motor behavior, spatial performance, training

Abstract

The present study investigated the influence of a juggling training on mental rotation performance in children. Two groups of girls ($N = 50$) at the age of 6 to 14 years solved a mental rotation task with three-dimensional block figures. Thereafter, one group received a juggling training for a period of three month, whereas the other group participated in a mild strength training. At the end of the training-period all children solved the mental rotation task again. The difference in the mental rotation performance between the pre- and the post-test was measured. Results showed that the gain in the reaction time was larger for the children who had learned to juggle compared with the children of the strength training-group when mental rotation had to be performed (i.e., when angular disparity was non-zero). This study provides evidence for the direct relation between motor coordination training and the visual spatial ability of mental rotation.

Introduction

It is the main goal of this paper to investigate experimentally the influence of a motor coordination task on a visual-spatial task in children at school-age. From the perspective of sport sciences it seems to be evident that physical fitness has some beneficial influence on cognitive performance (for an overview see Etnier, Nowell, Landers, & Sibley, 2006; Etnier, Salazar, Landers, Petruzzello, Han, & Nowell, 1997). Newson and Kemps (2008) recently showed that high-fitness adults performed better than low-fitness ones in reaction time-, attention-, working memory- and processing speed-tasks. In developmental psychology it was shown that a dysfunction in the motor development is often associated with a dysfunction in cognitive development and vice versa (Gillberg, 2003; Leary, 1996; Pitcher, Piek, & Hay, 2003). This relates to the specific assumption (e.g., Diamond, 2007) that motor development and movement experience are relevant factors for cognitive performance, especially for spatial abilities (Campos, Anderson, Barbu Roth, Hubbard, Hertenstein & Witherington, 2000). Spatial abilities are cognitive processes composed of visualization, orientation and mental rotation (Linn & Petersen, 1985) and fundamentally relevant for problem solving (Geary, Saults, Liu, & Hoard, 2000), mathematics (Hegarty & Kozhevnikov, 1999) and science (Peters, Chisholm, & Laeng, 1995).

Recent neuroimaging studies revealed a relation between motor and cognitive tasks. It was shown for example that mental and manual rotation share the same underlying processes (Kosslyn, DiGirolamo, Thompson, & Alpert, 1998; Wraga, Thompson, Alpert, & Kosslyn, 2003), but it is not well investigated from an experimental point of view that visual spatial abilities can be trained by motor activity. There are some studies which investigated the effect of motor training on the visual spatial task of mental rotation, i.e. the ability to imagine how an object would look if rotated away from the orientation in which it is actually presented (Shepard & Metzler, 1971). But these studies are limited by the fact that the mental rotation was trained by a motor rotation by moving a joystick (Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008;

Wiedenbauer, Schmid, & Jansen-Osmann, 2007) or by manipulating a wheel with a handle (Frick, Daum, Walser, & Mast, 2005).

What is absent until now is the experimental investigation of a “real” motor coordination training on a visual spatial task in children. There is only one study which investigated this effect in adults (Jansen, Titze & Heil, in press). The authors provided evidence that a juggling training over a period of three months improved mental rotation performance in adults, compared to a control group who did not receive any training. This result is supported from a neuroscientific point of view, because an increasing brain plasticity was shown after a training of juggling (Draganski, Gaser, Busch, Schuierer, Bogdahn, & May, 2004) in exactly that brain area (intraparietal sulcus) which is specifically involved in mental rotation (Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001).

Because of the study of Jansen, Titze, and Heil (in press) and the theoretical relation between motor and visual-spatial abilities in developmental psychology (Diamond, 2007) it is assumed that children at school age also profit from a juggling training in their mental rotation performance. Beyond that the present study expands the work of Jansen, Titze, and Heil (in press). Here, we investigate if the mental rotation performance improvement is indeed specific to a training of juggling. Therefore the control group in the present study received a non-coordination motor training, i. e. a mild strength training with theraband stretch bands.

Methods

Participants

Fifty-seven girls between the age of 6 and 14 years participated in this study. Twenty-nine girls were randomly assigned to the juggling-group (mean age 10.35 years), 28 to the strength training-group (mean age 10.46 years). Because seven children did not participate in the post-test, their data had to be excluded from analysis, resulting in a total group number of 50 children. All girls were members of a gymnastics-group and were tested and trained during

their regular gym-lessons. Before starting the test the parents of the children were informed of the intention of the following study and gave their consent for participation and data utilization. Furthermore the club committee as well as the gymnastics coach agreed in carrying out the experiments during the lessons. The children received the juggling-balls or the theraband stretch bands as a gratification and the whole gymnastics-group received 300 € for their participation. Each participant had normal or normally corrected visual acuity. None of the children were able to juggle before participating in this study.

Apparatus and stimuli

The pre- and the post mental rotation test took place in a quiet locker room respectively in a first-aid room in two different gyms in Wesel, Germany, in groups of three children. Each girl sat in front of her own laptop, with a distance of approximately 50 cm from a 15 inch monitor, not seeing the other participants. The experimental stimuli consisted of 18 perspective line drawings of three-dimensional forms (each one composed of 10 cubes) similar in construction to those used by Shepard and Metzler (1971) and Jansen-Osmann and Heil (2007), and were rotated in depth. Each one had a maximal size of 7 by 7 cm on the screen with a space of 14 cm between. In each trial two drawings of the same form were presented together. The stimulus presented on the right side of the monitor was either identical to the left or mirror-reversed. The angular disparity between the two stimuli was either 0°, 90°, or 180° (see Figure 1 for an example). Subjects responded “same” by pressing the left touchpad button with their index finger and “different” by pressing the right touchpad-button with their middle finger.

Insert Figure 1 about here.

Procedure

Participants of the juggling- and the strength training-group participated in two mental rotation sessions, one before and one after training. Individual test sessions lasted about 50 minutes per session. Each trial started with a background gray screen. After 500 ms, the pair of stimuli appeared and the subject had to decide, whether the two stimuli were “same” or “different” (mirror-reversed). The stimuli remained on the screen until the subject responded by pressing a touchpad-button. Participants were told to respond as quickly and as accurately as possible. To indicate whether the given response was correct (incorrect) a + (-) was displayed for 500 ms in the center of the screen. Trials were separated by intervals of 1500 ms background gray screen. After a block of 27 trials a short brake was terminated by the participant. Each combination of objects (18 different drawings), version (normal or mirror reversed) and angular disparity (0° , 90° , 180°) was presented four times during the test, which resulted in a total number of 432 trials. In order to make the participants familiar with the test-sequence, 54 unrecorded test-trials were added at the beginning of each session. The stimulus items were the same in the pre- and in the post-mental rotation test. Both tests were separated by an interval of three month. In this period the children of the experimental group (EG, juggling) received a juggling-training for 30 minutes two times a week, i.e. 15 minutes at the beginning of a regular gymnastics-lesson and 15 minutes at the end. The training followed the approach of Stephan Ehlers, a well-known German juggler (Ehlers, 2005). Additionally, the children were asked to train about ten minutes at every day at home. At every meeting the practice time and the amount of successful throws were registered. The children of the control group (CG, strength training) received a mild strength training with theraband stretch bands at the same time. Examples of the exercises were the following: a) „biceps-curls”: The child stood on the theraband with one foot. The ends of the theraband were grasped with one hand each and wrapped up until they were tight. Then both arms were bended alternately. b) “knee bend”: In this task the child stood on the theraband with both feet with a feet-distance of a

shoulder length. Then it hunkered down and wrapped the ends of the theraband upon its hands. After that the child sat up and stretched its arms vertically upwards simultaneously.

The children of the strength training-group were also asked to train at home and their amount of repetitions in the exercise “knee bend” was registered during the trainings-sessions.

Design

Only trials with correct response were used for reaction time (RT) analyses. Furthermore, the statistical analyses presented were restricted to “same” responses only, because angular disparity is not defined unequivocally for “different” responses (see, e.g., Jolicoeur, Regehr, Smith, & Smith, 1985). Prior to analyses data were trimmed. RTs more than two standard deviations above or below the mean per condition and per participant were excluded. Analyses with untrimmed data revealed identical results.

The dependent variable was the difference score in the error rates and RT between the pre-test and the post-test session (see i.e. Wiedenbauer, Schmid, & Jansen-Osmann, 2007). Univariate analyses of variance were calculated with the between-subject factor group (EG, CG) and the within-subject factor angular disparity (0°, 90°, 180°). Because age varied between 6 and 14 years age was considered as a co-variate. Furthermore the juggling-, respectively the strength training-performance was registered. The significance levels of all analyses of variance results were corrected according to the method of Huynh and Feldt (1976) to compensate for nonsphericity of the data.

Results

Motor Behavior

In the experimental group, juggling performance improved as a function of training: The mean increase of successful throws between the first and the last session was $\bar{x} = 16.8$

($\underline{SE} = 30.23$). The performance between the first and the last session differed significantly $F(1,25) = 7.77, p < .01, \eta^2 = .24$.

In the control group, the performance in the exercise „knee bend” increased as a function of training: The mean increase of the amount of repetitions between the first and the last session was $\bar{x} = 2.33$ ($\underline{SE} = 1.76$). This performance increase turned out to be significant $F(1,23) = 42.13, p < .01, \eta^2 = .65$.

Difference Score

For mental rotation RT-gain a significant main effect for group, $F(1,48) = 6.54, p < .05, \eta^2 = .12$, was found. Furthermore an interaction between age and angular disparity was found, $F(2,96) = 6.34, p < .01, \eta^2 = .12$. There was no main effect for angular disparity, $F(1,48) = 1.65, n.s., \eta^2 = .034$. The RT training gain for the children of the experimental group was larger at 90° , $F(1,48) = 8.20, p < .01, \eta^2 = .15$ (EG: $\bar{x} = 1764.91, \underline{SE} = 215.66$ and CG: $\bar{x} = 862.23, \underline{SE} = 224.47$) and 180° , $F(1,48) = 4.75, p < .05, \eta^2 = .09$ (EG: $\bar{x} = 1107.70, \underline{SE} = 144.18$ and CG: $\bar{x} = 647.86, \underline{SE} = 150.07$) but did not differ for 0° angular disparity, i.e. for trials where no mental rotation was executed, $F(1,48) = 3.38, n.s., \eta^2 = .07$ (EG: $\bar{x} = 865.14, \underline{SE} = 116.27$ and CG: $\bar{x} = 551.82, \underline{SE} = 121.02$). The results, which are shown in Figure 2, indicate that the participants of the juggling-group showed – in comparison to the strength training-group – a better performance in the post-training mental rotation session compared to the pre-training one. This holds only true for the angular disparity of 90° and 180° .

Concerning the difference scores of the error rates in the mental rotation test there was neither a significant influence of angular disparity, $F(2,96) = .30, n.s., \eta^2 = .01$ nor of group, $F(1,48) = 3.17, n.s., \eta^2 = .06$. Furthermore there was no interaction between both factors, $F(2,96) = .20, n.s., \eta^2 = .0$.

Insert Figure 2 about here.

Discussion

This study replicates and extends the findings of Jansen, Titze, and Heil (in press) towards school-age children by demonstrating the beneficial effects of a juggling training on mental rotation speed. Because we considered age as a covariate this effect is independent of the age of the children participating in this study. Additionally, the present results also demonstrate a first level of specificity of this effect - although admittedly more studies have to follow. Whereas Jansen et al. (in press) simply showed that juggling training improved mental rotation speed compared to a waiting group, the present study demonstrated that the gain in mental rotation speed due to a juggling training is larger than the gain due to a non-coordinative strength training. Moreover; the juggling training only affected the RT in the trials in which the angular disparity was 90° or 180° , but not in the trials with 0° angular disparity. Obviously, no mental rotation is required to compare the two stimuli in the 0° condition, for that this condition served as a kind of comparison-condition for the other two. As Figure 2 shows, the RT gain in the 90° condition is larger than in the 180° condition. In further studies, we will manipulate angular disparity in smaller steps to examine the effect in more detail to contemplate the relation between the specific components of juggling and mental rotation. In contrast to reaction time, there was no effect of juggling training on error rates. This finding is in accordance with many other studies showing that reaction time is the substantially more sensitive measurement for mental rotation effects than error rates (e.g. Heil, Rösler, Link, & Bajric, 1998).

One might speculate why juggling has this effect on mental rotation. Both share common features because both require a cyclic activity and have temporal and spatial

constraints. In juggling, hands move along more or less elliptical trajectories while throwing and catching balls in a regular fashion (Post, Daffertshofer, & Beek, 2000). In mental rotation one object is brought along a cyclic trajectory around the three axes to bring it in the position of the standard object. Whereas juggling may be thought of as a “spatial clock” (Post et al., 2000), mental rotation seems to be a covert manual rotation (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Furthermore, whereas juggling requires the mirrored movements of the hands, mental rotation requires the decision if two objects that were rotated were the same or mirrored. More studies have to follow in which the influence of the improvement of mental rotation is examined in comparison to different motor tasks, which refers cyclic activity of the hands, arms or the whole body, as for example lassoing, rope skipping, breaststroking or discus throwing.

Due to the fact that only girls participated in the present study further studies are needed with male participants, also with regard to the well known gender differences in mental rotation (but compare Jansen–Osmann & Heil, 2007). In addition to that the study should be replicated with different kinds of stimuli to be rotated. In the present study the stimuli were complex and rotated in depth. It would be interesting to find out, if there is a commensurate training effect on less complex stimuli rotated in picture plane, i.e. if the effects generalize to other stimuli. Does juggling as a 3-D task have an influence on 2-D stimuli?

This study proves the relation between juggling and mental rotation performance and in a broader sense between motor and cognitive performance. Thus the link between cognitive and motor processes, assumed by cognitive psychologists, is supported. But not only for psychology but also for sport sciences these results have important implications. This study supports the assumption of sport scientists that training in a sports task not only enhances motor learning but also cognitive learning. This makes a case for the claim for more sports lessons in school.

Another important question therefore arises: Is only spatial performance influenced by a training of juggling? Or are other cognitive abilities also influenced? According to Casey, Nuttall, and Pazaris (1997) there seems, for example, to be a link between mental rotation ability and maths performance. And Nilges (2000) outlined six spatial abilities which mediated physical as well as mathematical learning. Therefore one could draw the conclusion that a training of juggling could probably also enhance math performance. Furthermore it is worth evaluating how long a training of juggling has to last to have those positive effects on mental rotation performance. Perhaps it is possible to reduce the time period of juggling training while achieving the same effects on mental rotation performance. More empirical studies are still needed to evaluate all these aspects in detail.

Reference list

- Campos, J. J., Anderson, D. I., Barbu Roth, M. A., Hubbard, E. M., Hertenstein, M. J., & Witherington, D. (2000). Travel broadens the mind. *Infancy, 1*, 149-219.
- 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.
- Diamond, A. (2007). Interrelated and interdependent. *Developmental Science, 10*, 152-158.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature, 427*, 311-312.
- Ehlers, S. (2005). *REHORULI - Jonglieren lernen mit Erfolgsgarantie*. Norderstedt: Books on Demand.
- Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Reviews, 52*, 119-130.
- Etnier, J., Salazar, W., Landers, D., & Petruzello, S. (1997). The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *Journal of Exercise & Sport Psychology, 19*, 249-277.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, 39*, 175-191.
- 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. 720-725). Stresa Italy: University of Turin.

- Geary, D. C., Sauls, S. J., Liu, F., & Hoard, M. K. (2000). Sex differences in spatial cognition, computational fluency, and arithmetical reasoning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 337-353.
- Gillberg, C. (2003). Deficits in attention, motor control, and perception: a brief review [Oct]. *Archives of disease in childhood*, 88, 904-10.
- Hegarty, M., & Kozhevnikov, M. (1999). Types of visual-spatial representations and mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 91, 684-689.
- Heil, M., Rösler, F., Link, M., & Bajric, J. (1998). What is improved, if a mental rotation task is repeated - Efficiency of memory access, or the speed of a transformation routine? *Psychological Research*, 61, 99-108.
- Huynh, H., & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box correction for degrees of freedom from sample data in randomized block and split-plot designs. *Journal of Educational Statistics*, 1, 69-82.
- Jansen, P., Titze, C., & Heil, M. (in press). The influence of juggling on mental rotation performance. *Journal of International Sport Psychology*.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007). Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain and Cognition*, 64, 217-227.
- Jolicoeur, P., Regehr, S., Smith, L. B. J. P., & Smith, G. N. (1985). Mental rotation of representations of two-dimensional and three-dimensional objects. *Canadian Journal of Psychology*, 39, 100-129.
- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M., & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, 13, 143-52.
- 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.

- Leary, M. R. (1996). Moving on: Autism and movement disturbance. *Mental Retardation*, 34, 39-53.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.
- Newson, R. S., & Kemps, E. B. (2008). Relationship between fitness and cognitive performance in younger and older adults. *Psychology and Health*, 23, 369-386.
- Nilges, L. (2000). The Role of Spatial Ability in Physical Education and Mathematics. *The Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 71, 29-32.
- Peters, M., Chisholm, P., & Laeng, B. (1995). Spatial ability, student gender and academic performance. *Journal of Engineering Education*, 84, 60-73.
- Pitcher, T. M., Piek, J. P., & Hay, D. A. (2003). Fine and gross motor ability in males with ADHD. *Developmental medicine and child neurology*, 45, 525-35.
- Post, A. A., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2000). Principal components in three-ball cascade juggling. *Biological Cybernetics*, 82, 143-152.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Wiedenbauer, G., & Jansen Osmann, P. (2008). Manual training of mental rotation in children. *Learning and Instruction*, 18, 30-41.
- Wiedenbauer, G., Schmid, J., & Jansen Osmann, P. (2007). Manual training of mental rotation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 19, 17-36.
- 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.

Figure Captions*Figure 1*

An example of the items of the mental rotation task.

Figure 2

Difference between the reaction times on the pre-training and the post-training mental rotation task. A higher score indicates a larger RT gain. The results are presented separately for the two groups and the three angular disparities. Error bars indicate standard errors.

Figure 1

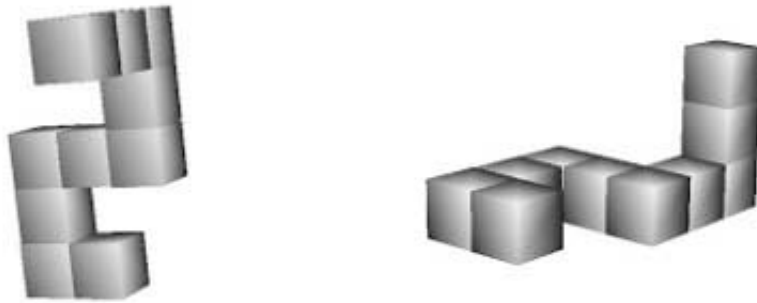
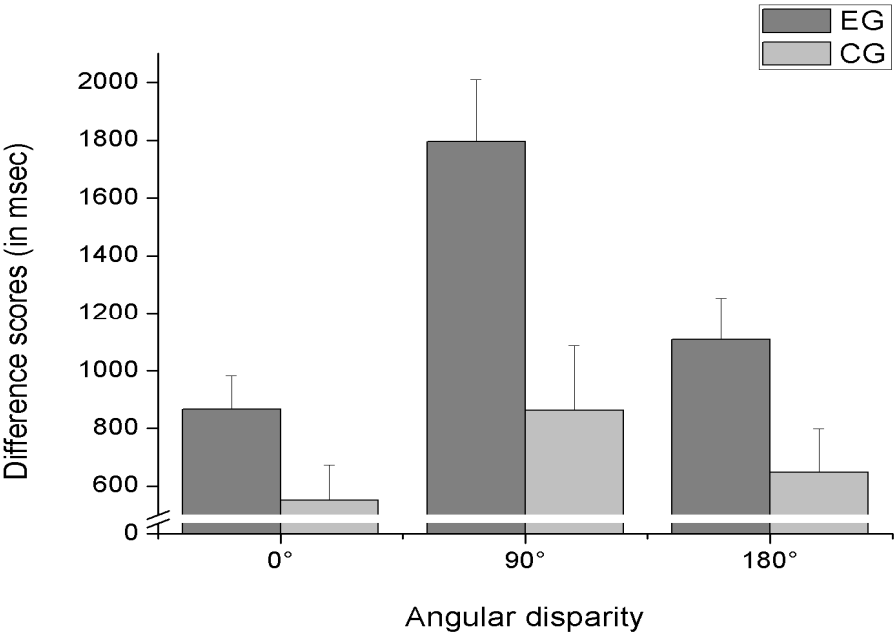


Figure 2



Running head: Mental rotation of 2D-stimuli

The effect of a juggling training on mental rotation of 2D-stimuli

Léonie F. Lange¹, Petra Jansen², & Martin Heil¹

¹ Institute of Experimental Psychology, Duesseldorf

² Institute of Sport Science, University of Regensburg

Corresponding author:

Léonie F. Lange

Institute of Experimental Psychology,

Heinrich-Heine-University, 40225 Düsseldorf, Germany.

Tel.: +49-211-811-4568

Fax: +49-211-811-3490

Email: LeonieF.Lange@uni-duesseldorf.de

Key words: mental rotation, children, training, motor behavior, spatial performance

Abstract

The present study investigated the influence of juggling training on the performance in a mental rotation task in children. Two groups of children ($N = 50$) at the age of ten to eleven years solved a mental rotation task with two-dimensional polygons. After this, one group was trained in juggling for a period of three month, whereas the other group participated in a mild strength-training. At the end of the training-period all children had to solve the mental rotation task again. The difference in the mental rotation performance between the pre- and post-test was measured and further analyzed. All children showed a better mental rotation performance in the post-test than in the pre-test. But, results also showed that there was no difference in the reaction time (RT) gain of the children who had learned to juggle compared to the children of the strength-training-group. This study demonstrates that the influence of juggling just become mentionable, if complex stimuli were used in the mental rotation task and do not generalize to other, two-dimensional stimuli.

Introduction

Many studies, especially in sport sciences, point out that physical fitness has a beneficial effect on cognitive performance (for an overview see Etnier, Nowell, Landers, & Sibley, 2006; or Etnier, Salazar, Landers, Petruzzello, Han, & Nowell, 1997). Newson and Kemps (2008) demonstrated that high-fitness adults perform better than low-fitness adults in tasks concerning reaction time, attention, working memory and processing speed. Beyond that, a more specific approach proves that motor development and cognitive development are fundamentally interrelated with another (Diamond, 2000; Rosenbaum, Carlson, & Gilmore, 2001) and similar mechanisms govern both (Paz, Wise, & Vaadia, 2004). Furthermore, a dysfunction in the development of one domain is often associated with a dysfunction in the other domain (Gillberg, 2003; Leary, 1996; Pitcher, Piek, & Hay, 2003).

Especially the performance in spatial tasks is influenced by movement experiences (Campos, Anderson, Barbu Roth, Hubbard, Hertenstein, & Witherington, 2000). Spatial abilities are a cognitive basic relevant for problem solving (Geary, Saults, Liu, & Hoard, 2000), mathematics (Hegarty & Kozhevnikov, 1999; Wing, 2005) and science (Peters, Chisholm, & Laeng, 1995; Spelke, 2005; Webb, Lubinski, & Benbow, 2007), but there are essential for efficient action in every day life, too.

Even in children at the age of four and five years a relation of mental rotation and motor development has been shown (Heil & Jansen, 2008). In this study 80 preschool-children performed a standardized motor test, a paper-and-pencil mental rotation test and a nonverbal intelligence test. A multiple regression analysis showed that intelligence and motor control abilities were significant and independent predictors of mental rotation performance.

According to Linn and Petersen (1985) spatial performance or spatial abilities are composed of visualization, orientation and mental rotation. Within these three factors, mental rotation, i. e. the cognitive process of imaging how an object would look if rotated away from the

orientation in which it is actually presented (Shepard & Metzler, 1971), is the most important one.

Training of mental rotation was the topic of many studies. With adults it could be demonstrated that after a training by repetition of mental rotations (e.g. Kail & Park, 1990; Kaushall & Parsons, 1981) there was a decrease in reaction time. Studies concerning mental rotation training in children are rare. In the study of Kail and Park even eleven-year-olds benefited from the extensive mental rotation training and their speed of mental rotation was about six times higher in the post- than in the pre-test. However, the training effect was restricted to the trained alphanumeric symbols and did not generalize on abstract symbols. Furthermore, there is evidence that the mental rotation process itself is not improved by a mental rotation training (Heil, Rösler, Link, & Bajric, 1998). In this study the training of mental rotation only had an effect on the reaction times of objects presented in the training and only if the objects were presented in exactly the same angular disparities as before. Therefore, a training by just repeating the mental rotation does not seem to accelerate the mental rotation process itself, but to replace this process by the retrieval of stored memory representations.

A motor training could be an appropriate method to improve the mental rotation process. It seems to be evident that mental and manual rotation are linked closely and share the same underlying cognitive processes (Wexler, Kosslyn, & Berthoz, 1998; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). In these studies it could be shown that a simultaneously performed manual rotation impaired the performance in a mental rotation task, if it was incompatible in direction. Frick, Daum, Walser, and Mast (2005) conducted a similar study with children. While executing a motor rotation by a manipulation of a wheel with a handle, the children (five, eight and eleven years old) and adults had to mentally rotate two-dimensional stimuli. It was found that there was a decrease in reaction times when mental and manual rotation were incongruent only for the 5 and 8 years old children. The authors concluded that mental and

motor processes are linked more closely in younger children than in older children and adults. Further evidence that mental and manual rotation share the same underlying processes stems from neuroimaging studies. E.g. Kosslyn, DiGirolamo, Thompson, and Alpert (1998) proved that motor and pre-motor areas, which are involved in the execution of movements, are also activated during mental rotation (see also Wraga, Thompson, Alpert, & Kosslyn, 2003).

Even though a close coupling of motor behavior and performance in spatial tasks is a popular and widespread assumption, studies concerning the effect of a motor training on mental rotation ability are rare. Furthermore, studies according to this topic are mostly disconnected from everyday life and do not contain “real” motor and sportive tasks. For example Wiedenbauer, Schmid and Jansen-Osmann (2007) evaluated a manual training of mental rotation in adults. The participants of the training group learned to manually rotate a block figure (similar to the stimuli used by Shepard & Metzler, 1971) into the orientation of a standard block figure by manipulating a joystick. In comparison to the control group, the members of the training group performed better in an afterwards presented, computer-based mental rotation test. However, those training effects were limited to the stimuli learned in the training and did not generalize to new stimuli. In a further study Wiedenbauer and Jansen-Osmann (2008) could show that in children this manual training was not object-specific, due to the closer relation between manual and mental rotation in children (Frick et al., 2005; Funk, Brugger, & Wilkening, 2005). Even children with spina bifida benefited considerably from the manual rotation training (Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2007). While the children with spina bifida showed a lower speed of mental rotation than their healthy peers in the mental rotation pre-test, the two groups did not differ in their mental rotation speed in the post-test. In a quasi-experimental study it was shown that athletes in comparison to non-athletes performed significantly better in a mental rotation task with abstract stimuli (Ozel, Larue, & Molinaro, 2002).

The first study testing directly the effect of a “real” motor training in the form of juggling training on mental rotation ability was the study of Jansen, Titze, and Heil (in press), delineated afterwards. The cognitive task of mental rotation and the motoric task of juggling share common features: Both involve cyclic activity and have spatial as well as temporal constraints. In mental rotation the task is to turn an object around mentally along a cyclic trajectory to bring it in the position of a standard object. Mental rotation has a one-to-one correspondence to the intermediate stages in an external, physical rotation, i. e. a mental rotation of x° passes through e. g. the mapping of $x^\circ/2$ around the three axes (Cooper, 1976; Cooper & Shepard, 1984). Furthermore, Shepard and Chipman (1974) could demonstrate that mental rotation is a second-order isomorphic process, i. e. neurophysiological processes of mental rotation and the processes while perceiving an external rotation were the same. In juggling, hands have to move along elliptical trajectories while throwing and catching balls in a regular fashion (Beek, 1989; Van Santvoord, 1995). In juggling, one hand moves clockwise and the other anti-clockwise and for this juggling is viewed as a “spatial clock” (Post, Daffertshofer, & Beek, 2000), whereas mental rotation seems to be a covert manual rotation (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Furthermore, juggling requires the mirrored movements of the hands and mental rotation requires the decision if a rotated object is the same or the mirror image of a standard object.

Those theoretical considerations were supported by different experiments. First, neuroscientific studies have revealed increasing nervous system plasticity after juggling-training (Draganski, Gaser, Busch, Schuierer, Bogdahn, & May, 2004) in exactly that brain area (intraparietal sulcus) which is involved in mental rotation (Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001). In the experiment of Draganski et al. (2004) the training group was trained in juggling for three month until they had become skilled performers. The control group got no training. Before and after the training-period a brain-scan was performed. Group comparison at the first scan showed no significant regional differences in gray matter between

jugglers and non-jugglers. But after the training the juggler group demonstrated, amongst other things, a significant bilateral expansion in the intraparietal sulcus, whereas the non-jugglers showed no change in gray matter over the same period. In an fMRI Jordan et al. (2001) proved that just the intraparietal sulcus was massively involved during mental rotation of different stimuli. These findings suggest that a juggling training might improve the performance in mental rotation tasks.

Second, in the aforementioned study of Jansen et al. (in press) it has been demonstrated that a training of juggling improved mental rotation performance over and above a test repetition. After three month of juggling training the adult participants in the study of Jansen et al. showed a larger RT-gain in a post mental rotation test than the control group, who did not get a training. Lange, Jansen and Heil (under review) expanded this study to younger participants and beyond that the control group in their study got also a motor training, i. e. a mild strength-training with theraband stretch-bands.

It could be shown that the gain in the reaction time was larger for the children who learned to juggle compared with the children of the strength-training-group when mental rotation had to be performed (i. e., when angular disparity was non-zero). Therefore even children can benefit from a juggling training and the mental rotation performance improvement is specific to a training of juggling and not a purely motor benefit.

It was the main goal of the present study to find out, if the effect of a juggling training as a three-dimensional task is even present with less complex, two-dimensional stimuli. In the studies of Jansen et al. and Lange et al. complex cube-figures, rotated in depth, were used. In the present study the used stimuli were two-dimensional, rotated in picture-plane.

Methods

Participants

A total of 50 children at the age of ten and eleven years (38 males, 12 females) were participating in this study. The children were randomly assigned to the juggling-group or to the strength training-group, so that each group consisted of 25 children (19 boys and 6 girls). All children were first graders of two classes of a secondary school in Essen, Germany and were tested and trained during their regular gym-lessons. Before starting the test, the parents of the children were informed of the intention of the study and gave their consent for participation and data utilization. Furthermore, the headmaster as well as the gymnastics coaches agreed in carrying out the experiments during the lessons. The children received a small gratification and both classes received 100 € for their participation. Each participant had normal or normally corrected visual acuity. None of the children were able to juggle before participating in this study. Given this sample size and a desired level of $\bar{\alpha} = .10$ (one tailed), an effect-size of $f = 0.25$ could be detected with a probability of $1 - \bar{\alpha} = .95$.

Apparatus and stimuli

The pre- and the post- mental rotation test took place in a quiet locker room in a gym. Four children participated simultaneously. Each child sat in front of its own laptop with a distance of approximately 50 cm from a 15 inch monitor, not seeing the other participants. The experimental stimuli consisted of pairs of polygons (Heil & Jansen-Osmann, 2008). Each one had a size of 8 by 8 cm on the screen with a space of 4 cm between. The complexity of the polygons was manipulated. The three simple polygons had five or six vertices; the three complex polygons had 13 or 14 vertices (see Figure 1). The stimulus presented on the right side of the monitor was either identical to the left or mirror-reversed. The angular disparity between the two stimuli was 30°, 90°, or 150° (clockwise or counterclockwise). Subjects

responded “same” by pressing the left touch-pad button with their index finger and “different” by pressing the right touch-pad button with their middle finger.

Insert Figure 1 about here.

Procedure

Participants of the juggling- and the strength training-group participated in two mental rotation sessions, one before and one after training. Individual test sessions lasted about 40 minutes per session. Each trial started with a background gray screen. After 500 ms, the pair of polygons appeared and the subject had to decide, whether the two stimuli were “same” or “different” (mirror-reversed). The stimuli remained on the screen until the subject responded by pressing a touch-pad-button. Participants were told to respond as quickly and as accurately as possible. To indicate, whether the given response was correct (incorrect) a + (-) was displayed for 500 ms in the center of the screen. Trials were separated by intervals of 1500 ms background gray screen. After a block of 72 trials a short brake was terminated by the participant. Each combination of polygons (3), polygon complexity (2), version (same/mirror reversed), angular disparity (30°, 90°, 150°) and direction of rotation (clockwise/counterclockwise) was presented six times during the test, resulting in a total number of 432 trials. In order to make the participants familiar with the test-sequence, twelve unrecorded test-trials were added at the beginning of each session. The stimulus items were the same in the pre- and in the post- mental rotation test. Both tests were separated by an interval of three month. In this period the children of the experimental group (EG, juggling) received a juggling-training for 30 minutes two times a week, i. e. 15 minutes at the beginning of a regular gymnastics-lesson and 15 minutes at the end. The training followed the approach

of Stephan Ehlers, a well-known German juggler (Ehlers, 2005). At every meeting the amount of successful throws was registered. The children of the control group (CG, strength training) received a mild strength training with theraband stretch bands at the same time. Examples of the exercises were the following: a) „biceps-curls”: The child stood with one foot on the theraband. The ends of the theraband were grasped with one hand each and wrapped up until they were tight. Then both arms were bended alternately; b) “knee bend”. In this task the child stood with both feet with a distance of a shoulder length on the theraband. Then it hunkered down and wrapped the ends of the theraband upon its hands. After that the child sat up and stretched its arms vertically upwards simultaneously.

The children were also asked to train at home and their amount of repetitions in the exercise “knee bend” were registered during the trainings-sessions.

Design

Only trials with correct response were used for reaction time (RT) analyses. Furthermore, the statistical analyses presented were restricted to “same” responses only, because angular disparity is not defined unequivocally for “different” responses (see, e. g., Jolicoeur, Regehr, Smith, & Smith, 1985). Prior to analyses data were trimmed. RTs more than two standard deviations above or below the mean per condition and per participant were excluded. Analyses with untrimmed data revealed identical results.

The dependent variable was the difference score in the error rates and RT between the pre-test and the post-test session (see Wiedenbauer et al., 2007; Jansen et al., in press). A univariate analysis of variance was calculated with the between-subject factor group (EG, CG) and the within-subject factor angular disparity (0° , 90° , 180°). Furthermore the juggling performance, respectively the strength training performance, was registered. The significance levels of all analyses of variance results were corrected according to the method of Huynh and Feldt (1976) to compensate for non-sphericity of the data.

Results

Motor Behavior

In the experimental group, juggling performance improved as a function of training: The mean increase of successful throws between the first and the last session was $\bar{x} = 17.1$ ($\underline{SE} = 25.40$). The performance between the first and the last session differed significantly $F(1,24) = 11.30, p < .01, \eta^2 = .32$.

In the control group, the performance in the exercise „knee bend” increased as a function of training: The mean increase of the amount of repetitions between the first and the last session was $\bar{x} = 21.72$ ($\underline{SE} = 8.25$). This performance increase turned out to be significant $F(1,24) = 17.33, p < .01, \eta^2 = .88$.

Difference Score

For mental rotation RT-gain a significant main effect for angular disparity was found; $F(2,96) = 3.32, p < .05, \eta^2 = .65$. The RT-gain was largest for stimuli rotated 150° ($\bar{x} = 734.63, \underline{SE} = 69.05$) and smallest for stimuli rotated 30° ($\bar{x} = 680.39, \underline{SE} = 62.55$). Furthermore, there was a main effect of complexity ($F(1,48) = 74.7, p < .01, \eta^2 = .61$), indicating a larger RT-gain for complex ($\bar{x} = 813.92, \underline{SE} = 68.82$) than for simple polygons ($\bar{x} = 606.36, \underline{SE} = 63.64$). There was no main effect for group, $F(1,48) = .873, n.s., \eta^2 = .001$ (see Figure 2).

Concerning the difference scores of the error rates in the mental rotation test there was neither a significant influence of angular disparity, $F(2,96) = .54, n.s., \eta^2 = .01$, nor of group, $F(1,48) = .16, n.s., \eta^2 = .0$ or complexity, $F(1,48) = .28, n.s., \eta^2 = .01$.

Insert Figure 2 about here.

Discussion

In this experiment the improvement of mental rotation performance was shown to be no more specific for a training of juggling, as demonstrated by Jansen et al. (in press) and Lange et al. (under review). Whereas in those studies three-dimensional stimuli were used, in the present study the stimulus material consisted of two-dimensional polygons. The juggling training, which requires a spatial, three-dimensional coordination of hands, obviously just showed an effect in a mental rotation task, in which tree-dimensional stimuli were used.

Contemplating the empirical data with regard to that topic, it becomes apparent that in all studies showing a link between a two-dimensional movement and mental rotation performance, two-dimensional stimuli were used (Frick et al., 2005; Wexler, et al., 1998; Wiedenbauer et al., 2007; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008). In contrast, all studies applying a three-dimensional movement, even the used stimulus material in the mental rotation task has been three-dimensional (Jansen et al., in press; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Therefore, to get a motor effect, movement and stimulus material should share the same dimensions.

In industrial ergonomics research it is a well known fact that spatial compatibility between stimulus and response is an important factor to consider, when determining equipment designs aimed at enhancing human performance. An example of the importance of spatial compatibility was given by the study of Bayerl, Miller, and Lewis (1988), showing that reaction times decreased significantly when the spatial positions of the functional keys and the labels for these keys on the screen corresponded. Even later studies on control-burner arrangements (Hsu & Peng, 1993) or on the use of a lever in response to a discrete stimulus (Chua, Weeks, Ricker, & Poon, 2001) demonstrated the significance of spatial compatibility for reaction time gain. Koch and Jolicoeur (2007) proved that effects of spatial compatibility are existent across tasks.

Umiltà and Nicoletti (1990) explained the concept of spatial compatibility by the hypothesis of an additional cognitive step to reconcile the spatial position of stimuli and responses, if the pairing of stimulus and response positions were incompatible. This translation step causes longer reaction times. This explanation could be adopted to the results of the present study and of the studies of Jansen et al. (in press) and Lange et al. (under review). If the participants learn a three-dimensional movement they create a mental concept of it, which is accessed in mental rotation with three-dimensional stimuli and therefore accelerates the reaction time in this task. In contrast, if two-dimensional stimuli instead of a three-dimensional ones should be rotated, the mental concept of the three-dimensional movement does not fit, it has to be translated and this additional cognitive step causes longer reaction times. That there are in fact neurophysiological differences between the perception of three- and two-dimensional stimuli was e. g. shown by Merboldt, Baudewig, Treue, and Frahm (2002) and by Diwadkar, Carpenter, and Just (2000).

To test, whether a trained movement and the stimulus material in a mental rotation task should share the same dimensions to get a trainings effect, the effect of a two-dimensional movement on mental rotation speed of three-dimensional stimuli could be examined. Furthermore, it would be interesting to explore, if there is on the one hand also an effect of juggling training on three-dimensional stimuli less complex than cube-figures or on the other hand on very complex two-dimensional stimuli.

Further on, more studies have to follow in which the improvement of mental rotation performance due to a training of juggling is examined in comparison to different motor tasks, which refers cyclic activity of the arms or the body, as for example breast-stroking or discus throwing. In this regard it would also be interesting to test, if the motor rotation of the hands has to be perceived by the participant to have an influence on mental rotation performance. The study of Wohlschläger and Wohlschläger (1998) suggested that there is no visual perception of manual rotation required to effect mental rotation.

Another important question arises: Is only spatial performance influenced by a training of juggling? Or are other cognitive abilities also influenced? According to Casey, Nuttall, and Pazaris (1997) there seems, for example, to be a link between mental rotation ability and maths performance. And Nilges (2000) outlined six spatial abilities which mediated physical as well as mathematical learning. Therefore one could draw the conclusion that a training of juggling could probably also enhance math performance. More empirical studies are still needed to evaluate all these aspects in detail.

Reference list

- Bayerl, J. P., Millen, D. R., & Lewis, S. H. (1988). Consistent layout of function keys and screen labels speeds user responses. *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, 344-346.
- Beek, P. J. (1989). Timing and phase locking in cascade juggling. *Ecological Psychology*, 1, 55-96.
- Campos, J. J., Anderson, D. I., Barbu Roth, M. A., Hubbard, E. M., Hertenstein, M. J., & Witherington, D. (2000). Travel broadens the mind. *Infancy*, 1, 149-219.
- Casey, M. B., 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.
- Chua, R., Weeks, D. J., Ricker, K. L., & Poon, P. (2001). Influence of operator orientation on relative organizational mapping and spatial compatibility. *Ergonomics*, 44, 751-765.
- Cooper, L. A. (1976). Demonstration of a mental analog of an external rotation. *Perception and Psychophysics*, 19, 296-302.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1984). Turning something over in the mind. *Scientific American*, 251, 106-114.
- Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child Development*, 71, 44-56.
- Diwadkar, V. A., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (2000). Collaborative activity between parietal and dorso-lateral prefrontal cortex in dynamic spatial working memory revealed by fMRI. *Neuroimage*, 12, 85-99.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427, 311-312.
- Ehlers, S. (2005). *REHORULI - Jonglieren lernen mit Erfolgsgarantie*. Norderstedt: Books on Demand.

- Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Reviews*, 52, 119-130.
- Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., & Nowell, P. (1997). The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19, 249-277.
- 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.
- Geary, D. C., Saults, S. J., Liu, F., & Hoard, M. K. (2000). Sex differences in spatial cognition, computational fluency, and arithmetical reasoning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 337-353.
- Gillberg, C. (2003). Deficits in attention, motor control, and perception: a brief review. *Archives of disease in childhood*, 88, 904-910.
- Hegarty, M., & Kozhevnikov, M. (1999). Types of visual-spatial representations and mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 91, 684-689.
- Heil, M., & Jansen, P. (2008). Aspects of code-specific memory development. *Current Psychology*, 27, 162-168.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (2008). Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: Do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 683-689.

- 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.
- Hsu, S.-H., & Peng, Y. (1993). Control/display relationship of the four-burner stove: a reexamination. *Human Factors*, 35, 745-749.
- Huynh, H., & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box correction for degrees of freedom from sample data in randomized block and split-plot designs. *Journal of Educational Statistics*, 1, 69-82.
- Jansen, P., Titze, C., & Heil, M. (in press). The influence of juggling on mental rotation performance. *International Journal of Sport Psychology*.
- Jolicoeur, P., Regehr, S., Smith, L. B. J. P., & Smith, G. N. (1985). Mental Rotation of Representations of Two-Dimensional and 3-Dimensional Objects. *Canadian Journal of Psychology*, 39, 100-129.
- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M., & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, 13, 143-152.
- Kail, R., & Park, Y. S. (1990). Impact of practice on speed of mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 227-244.
- Kaushall, P., & Parsons, L. M. (1981). Optical information and practice in the discrimination of 3-D mirror-reflected objects. *Perception*, 10, 545-562.
- Koch, I., & Jolicoeur, P. (2007). Orthogonal cross-task compatibility: Abstract spatial coding in dual tasks. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 45-50.
- 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.
- Lange, L. F., Jansen, P., & Heil, M. (under review). The influence of juggling on mental rotation performance in children.

- Leary, M. R. (1996). Moving on: Autism and movement disturbance. *Mental Retardation*, 34, 39-53.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.
- Merboldt, K. D., Baudewig, J., Treue, S., & Frahm, J. (2002). Functional MRI of self-controlled stereoscopic depth perception. *Neuroreport*, 13, 1721-1725.
- Newson, R. S., & Kemps, E. B. (2008). Relationship between fitness and cognitive performance in younger and older adults. *Psychology and Health*, 23, 369-386.
- Nilges, L. (2000). The Role of Spatial Ability in Physical Education and Mathematics. *The Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 71, 29-32.
- Ozel, S., Larue, J., & Molinaro, C. (2002). Relation between sport activity and mental rotation: Comparison of three groups of subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 95, 1141-1154.
- Paz, R., Wise, S. P., & Vaadia, E. (2004). Viewing and doing: Similar cortical mechanisms for perceptual and motor learning. *Trends in Neurosciences*, 27, 496-503.
- Peters, M., Chisholm, P., & Laeng, B. (1995). Spatial ability, student gender, and academic performance. *Journal of Engineering Education*, 84, 69-73.
- Pitcher, T. M., Piek, J. P., & Hay, D. A. (2003). Fine and gross motor ability in males with ADHD. *Developmental medicine and child neurology*, 45, 525-535.
- Post, A. A., Daffertshofer, A., & Beek, P. J. (2000). Principal components in three-ball cascade juggling. *Biological cybernetics*, 82, 143-152.
- Rosenbaum, D. A., Carlson, R. A., & Gilmore, R. O. (2001). Acquisition of intellectual and perceptual-motor skills. *Annual review of psychology*, 52, 453-470.
- Shepard, R. N., & Chipman, S. (1970). Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. *Cognitive Psychology*, 1, 1-17.

- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Spelke, E. S. (2005). Sex Differences in Intrinsic Aptitude for Mathematics and Science?: A Critical Review. *American Psychologist*, 60, 950-958.
- Umiltà, C., & Nicoletti, R. (1990). Spatial stimulus-response compatibility. In R. W. Proctor & T. G. Reeve (Eds.), *Stimulus-response compatibility: An integrated perspective* (pp. 89-116). North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Van Santvoord, A. A. M. (1995). *Cascade juggling: learning, variability and information*. Unpublished doctoral dissertation, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Webb, R. M., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2007). Spatial ability: A neglected dimension in talent searches for intellectually precocious youth. *Journal of Educational Psychology*, 99, 397-420.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- Wiedenbauer, G., & Jansen-Osmann, P. (2007). Mental rotation ability of children with spina bifida: What influence does manual rotation training have? *Developmental Neuropsychology*, 32, 809-824.
- Wiedenbauer, G., & Jansen-Osmann, P. (2008). Manual training of mental rotation in children. *Learning and Instruction*, 18, 30-41.
- Wiedenbauer, G., Schmid, J., & Jansen-Osmann, P. (2007). Manual training of mental rotation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 19, 17-36.
- Wing, R. E. (2005). Spatial components of mathematical problem solving. *Dissertation Abstracts International: Section B: The Sciences and Engineering*, 66, 1194.
- 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.

Figure Captions*Figure 1*

An example of the items of the mental rotation task. The stimulus presented on the right is a mirror image of the left and rotated 90° clockwise.

Figure 2

Difference between the reaction times in the pre-training and the post-training mental rotation task. A higher score indicates a larger RT gain. The results are presented separately for the two groups and the three angular disparities. Error bars indicate standard errors.

Figure 1

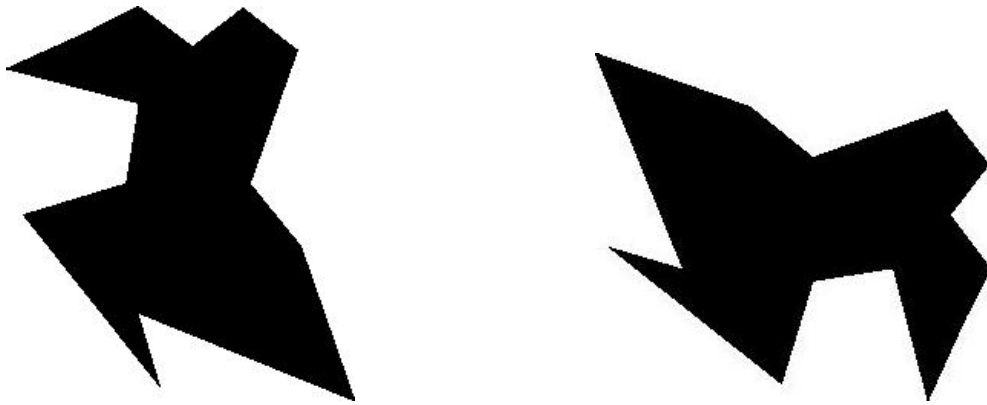
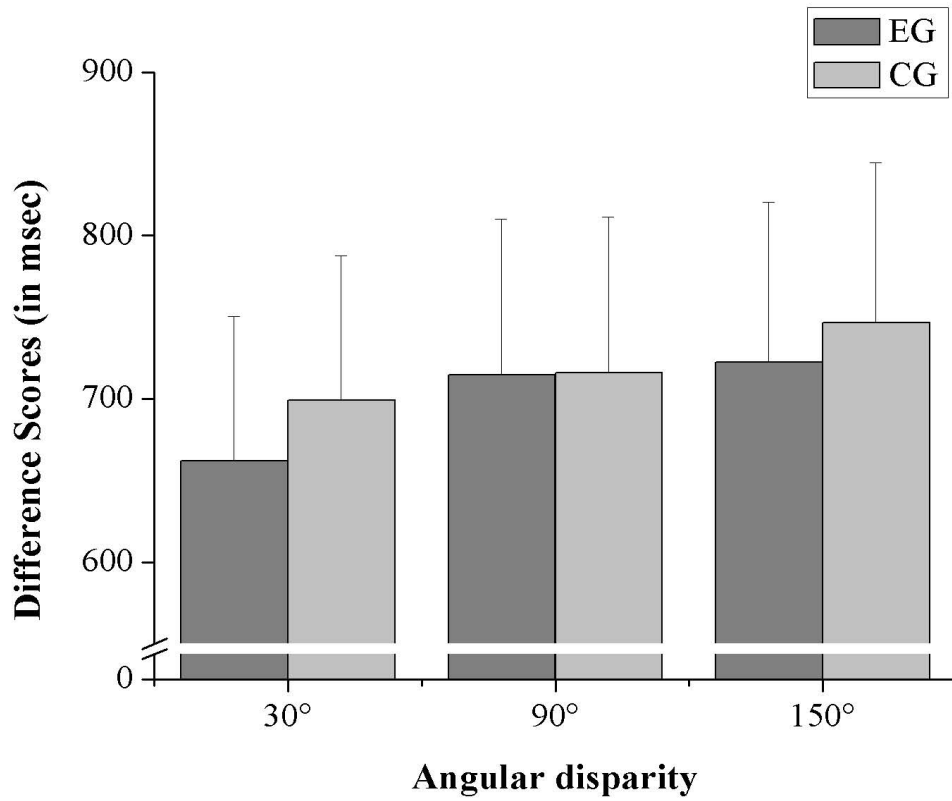


Figure 2



Running head: DEVELOPMENTAL PSYCHOPHYSIOLOGY OF MENTAL ROTATION

Does children's left hemisphere lateralization during mental rotation depend upon the stimulus material?

Léonie F. Lange¹, Martin Heil¹, & Petra Jansen²

¹ Institute of Experimental Psychology, Düsseldorf

² Institute of Sport Science, University of Regensburg

Corresponding author:

Léonie F. Lange

Institute of Experimental Psychology

Heinrich-Heine-University, 40225 Düsseldorf, Germany.

Tel.: +49-211-811-4568

Fax: +49-211-811-3490

Email: LeonieF.Lange@uni-duesseldorf.de

Key words: mental rotation, ERPs, children, laterality, developmental cognitive neuroscience

Abstract

Recent publications suggest that there is a developmental-based change of lateralization of brain activity during mental rotation from left to bilateral. But it is an open question, if this left hemisphere activation could also be observed with stimuli other than characters. To test this behavioral data and event-related potentials (ERPs) were measured in 28 children, 28 juveniles and 28 adults during a mental rotation task with animal drawings. The results showed that reaction times (RTs) and error rates decreased with increasing age of the participants. Furthermore RTs and error rates increased with increasing angular disparity. An un-lateralized ERP amplitude modulation at parietal electrodes as a function of angular disparity was present in all age groups. These results are in contrast to former studies that revealed a left lateralization in children when characters were used as stimuli for mental rotation. This left hemisphere activation is therefore not a general developmental trend but it is suggested that it might be a correlate of written language acquisition.

Mental rotation is a continuous cognitive process of spatial transformation, which makes it possible to imagine how an object would look if rotated away from the orientation in which it is actually presented (Shepard & Metzler, 1971). This important aspect of spatial intelligence, implemented in the parietal cortex (Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001), is assumed to be lateralized to the right hemisphere (for a review, see Corballis, 1997). The asymmetry seems to be critically dependent upon a number of factors like subject's gender, handedness, spatial intelligence, sex steroid level, as well as the dimensionality of the rotation, the difficulty of the task, and the type of stimuli used (for a review, see Heil & Jansen-Osmann, 2007). The pattern of data is difficult to integrate since these factors interact in quite complex ways. A bilateral activation of both hemispheres seems to be present when two-dimensional stimuli (e.g., characters, Heil, 2002) are used.

In a number of mental rotation studies with adults, it was found that the amplitude of event-related potentials (ERPs) extracted from the EEG is systematically related to the orientation of the stimulus: The stimulus-evoked positivity becomes relatively more negative with increasing angular disparities from the upright (Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989). Wijers et al. (1989) suggested that this relative negativity should be understood as an electrophysiological correlate of mental rotation itself (FOOTNOTE 1). This idea was validated in a number of recent studies (for a review, see Heil, 2002).

Little is known about the development of hemispheric laterality with respect to mental rotation. Recently, Jansen-Osmann and Heil (2007a) presented the first study in which the well-known ERP-effect during mental rotation of characters was not only observed with adults, but also with juveniles aged 11 to 12 years as well as with children aged seven or eight years. Most importantly, a developmental change in the pattern of hemispheric asymmetry of the parietal ERP effect as a function of character orientation was reported. With adults, a bilateral parietal amplitude modulation was replicated (Heil, 2002). For children the results

indicated a substantially greater left compared to right parietal amplitude modulation as a function of character orientation. I.e., the larger the angle an object had to be rotated around mentally, the more the neural activity of children was lateralized to the left hemisphere.

These findings could be of great importance for developmental cognitive neuroscience as long as they are reliable and specific for mental rotation. Therefore, Heil and Jansen-Osmann (2007) measured the ERPs of seven or eight year-old children twice: (a) during mental rotation with characters as stimuli and (b) during memory scanning (Sternberg, 1966), again with characters as stimuli and varying set sizes. In both cases, an amplitude modulation of the ERP was found. The effect of mental rotation again turned out to be lateralized to the left hemisphere. The effect of memory scanning was found to be symmetric (as is usually found with adults, e.g., Heil, Hennighausen, & Özcan, 1999). Thus children's left hemisphere activation during mental rotation is reliable as well as specific for mental rotation as long as characters are used as stimuli. It is still an open question, if this left hemisphere activation could also be observed with alternative stimuli like animal drawings. If so, then the development of mental rotation in general should be understood as a function that becomes more and more independent of processes localized in the left hemisphere. If not, the specificity of mental rotation with characters should be more closely evaluated. Therefore we investigated ERP-effects of mental rotation with animal drawings in children, juveniles and adults to answer the question: Does children's left hemisphere activation during mental rotation depend upon the stimulus material?

Methods

Participants

Twenty-eight children (mean age: 7.7 years; age range: 7.2 – 8.4 years), 28 juveniles (mean age: 11.6 years; age range: 10.9 – 12.1 years) and 28 adults (mean age: 24.2 years; age range: 19.4 – 29.3 years) participated in this study. Gender ratio was balanced in each age

group. Before testing, all parents gave their informed written consent for children's participation.

Materials and procedure

The experimental stimuli consisted of coloured drawings of 12 different animals (camel, crocodile, dog, donkey, elephant, bear, lion, pig, rhino, sheep, turtle and zebra from Rossion & Pourtois, 2004). In each trial two drawings of the same animal were presented together. The left drawing was presented always upright facing either to the left or to the right. The right drawing was either facing to the same side or was a mirror image of the left. Furthermore, the right drawing was rotated 30°, 90° or 150° clockwise or counterclockwise (for an example see Figure 1). Participants were told to mentally rotate the right drawing until the animal "stands on its feet" and then to compare the two drawings for a match or a mismatch in shape. If the two presented animals were facing to the same side, subjects responded "same" by pressing the left mouse button. If the drawings were mirror images, subjects pressed the right mouse button to respond "different".

Individual test session lasted about 1.5 h. Each trial started with the appearance of a fixation point in the center of the screen. One second later the two drawings were presented and remained visible until a response was given. Participants were told to respond as quickly and as accurately as possible. Furthermore the participants were instructed to avoid eye as well as other body movements. To indicate whether the response was correct (incorrect) a + (-) was displayed for 500 ms. Trials were separated by randomly varying intervals of 1 - 3 s and were presented in blocks of 48 trials each. Each combination of drawing (12), version (normal or mirror-image) and orientation (30°, 90°, 150°) was presented four times resulting in 288 trials. To familiarize participants with the task, 48 unrecorded practice trials were added.

EEG-analysis

The EEG was recorded monopolarly, with AgAgCl-electrodes from frontal (Fz),

central (Cz) and parietal (left: P3; midline: Pz; right: P4) leads with digitally averaged earlobes as reference. Horizontal and vertical eye movements were monitored by two channels. The left mastoid served as ground. Electrode impedance was kept below five k Ω . Band pass was set from DC to 40 Hz; the digitalization rate was 250 Hz. All trials were inspected off-line, and those contaminated with artifacts (blinks, eye or other body movements) were rejected. From the edited set of raw data, we extracted ERPs by averaging single trials with correct responses. The average amplitude of the epoch 400 - 800 ms after stimulus presentation (see Heil, Rauch, & Hennighausen, 1998) was used as the dependent variable, with reference to a pre-stimulus baseline of 100 ms duration. The significance levels of all analyses of variance results were corrected to compensate for non-sphericity.

Results

For all ANOVAs, gender was introduced as a between-subject effect but did not result in any reliable main effects or interaction. Therefore, results are presented collapsed across gender.

Behavioral data

Prior to analyses, RT data were trimmed. RTs more than two standard deviations (SD) above or below the mean per subject and condition were excluded from RT analysis. We found significant main effects of age group, $F(2, 78) = 27.99, p < .01$, and angular disparity, $F(2, 156) = 632.52, p < .01$, and an interaction of both factors, $F(4, 156) = 2.69, p < .05$. RTs decreased with increasing age and increased with increasing angular disparity. Moreover, RT increase was fully linear only for the children but curvy-linear for the juveniles and the adults (see Figure 2).

Error-rates also increased with increasing angular disparity, $F(2, 156) = 48.68, p < .01$ and decreased with increasing age, $F(2, 78) = 82.60, p < .01$. Bonferroni post-hoc test revealed that adults and juveniles made fewer errors than the children (all $p < .05$). The mean

overall error-rate was 3% for adults, 5% for juveniles and 18% for children.

The interaction of the two factors angular disparity and age was also significant, $F(4, 156) = 13.68, p < .01$, since adults and juveniles made more errors with 150° than with 90° angular disparity, whereas the younger children did not.

ERPs

At all five scalp-electrodes the amplitude of ERPs decreased with increasing age ($F(2, 78) = 19.70, p < .01$). Furthermore there was a significant main effect of orientation at all five electrodes, which was present in all three age groups ($F(2, 52) = 49.25, 53.73$ and 27.48 , respectively, for adults, juveniles and children; all $p < .01$). The most pronounced effects of orientation were observed at the parietal leads ($F(2, 162) = 103.07, 109.32$ and 91.82 , respectively, for Pz, P3 and P4; all $p < .01$). Mental rotation evoked a large positivity and the amplitude of this positivity decreased with increasing angular disparity (see Figure 3).

In order to test the laterality of the orientation effect an ANOVA was run with the factors orientation and laterality (electrodes P3 versus P4) as within-subjects factors and age group as between-subjects factor. Besides the significant main effects of angular disparity ($F(2, 162) = 109.38$) and age group ($F(2, 81) = 37.72$, both $p < .01$), no other significant effect was found (all $p > .15$). Additionally, we analyzed the three different age groups separately. Laterality was not statistically significant in any of the three age groups ($F(1, 27) = 1.52, 0.68$ and 1.83 , all $p > .20$).

Discussion

The amplitude modulation as a function of mental rotation was replicated with adults, juveniles and children even though animal drawings were used as stimuli. In contrast to former studies (Jansen-Osmann & Heil, 2007a; Heil & Jansen-Osmann, 2007) that used characters, the amplitude modulation was not lateralized at all, not even for the children. Thus, a left lateralization for children was present when characters had to be mentally rotated

(Jansen-Osmann & Heil, 2007) but was absent when characters had to be used for memory scanning (Heil & Jansen-Osmann, 2007) and was also absent when line drawings had to be mentally rotated. This means that children's left hemisphere lateralization during mental rotation indeed depends upon the stimulus material. This pattern of results, in fact, contradicts present neuropsychological theories of mental rotation. According to Corballis (1997), lateralization of mental rotation should be understood as a function of task difficulty and participant's competence. If the former is high and/or the latter is low, then the left hemisphere should preferentially be engaged. This might explain the findings for children in contrast to adults rotating characters but it does not explain the findings with line drawings in contrast to characters. Based on both error rates and response times, a comparison of the present data with those of Jansen-Osmann and Heil (2007a) reveals that line drawings do not differ from characters with respect to task difficulty, neither for adults (see also Jansen-Osmann & Heil, 2007b) nor for children.

Therefore, we postulate a different and in fact interesting account that definitely needs additional empirical evidence. When mentally rotating a character, its visuo-spatial representation has to be manipulated, but when a memory set of characters has to be scanned, its articulatory representations are used. According to our point of view, the left lateralization during mental rotation of characters for children aged seven or eight years should be understood as an indicator of written language acquisition (Petersson, Silva, Castro-Caldas, Ingvar, & Reis, 2007; Aylward et al., 2003). Fragmentary written language acquisition is critical when characters are mentally rotated but not when line drawings are mentally rotated and when the visuo-spatial representation of characters but not when its articulatory representation is used. If correct, it would have important implications for the diagnosis of dyslexia: The left lateralization during mental rotation of characters might be used as an early indicator of impaired written language acquisition. Nergard-Nilssen (2006) pointed out that

identifying prognostic indicators that were associated with dyslexia is complicated. In his study just one of the factors thought to indicate dyslexia turned out to be prognostic. And tests assumed to predict language acquisition were shown not to be valid (e.g. Waber, Wolff, Forbes, & Weiler, 2000). But for effective intervention an early identification of children with language issues is indeed critical (Massa, Gomes, Tartter, Wolfson, & Halperin, 2008). At least two empirical predictions regarding the hemispheric asymmetry during mental rotation with characters should therefore be tested: Dyslectics should show a left lateralization even when they are juveniles or adults whereas seven-year-old children should already show a bilateral activation when they possess a high competence in written language.

References

- Aylward, E. H., Richards, T. L., Berninger, V. W., Nagy, W. E., Field, K. M., Grimme, A. C., Richards, A. L., Thomson, J. B., & Cramer, S. C. (2003). Instructional treatment associated with changes in brain activation in children with dyslexia. *Neurology*, *61*, 212-219.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, *57*, 100-121.
- Heil, M. (2002). The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology*, *39*, 535-545.
- Heil, M., Hennighausen, E., & Özcan, M. (1999). Central response selection is present during memory scanning, but hand-specific response preparation is absent. *Psychological Research*, *62*, 289-299.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (2007). Children's left parietal brain activation during mental rotation is reliable as well as specific. *Cognitive Development*, *22*, 280-288.
- Heil, M., Rauch, M., & Hennighausen, E. (1998). Response preparation begins before mental rotation is finished: Evidence from event-related brain potentials. *Acta Psychologica*, *99*, 217-232.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007a) Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *NeuroReport*, *18*, 175-178.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007b). Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain and Cognition*, *64*, 217-227.
- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M., & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, *13*, 143-152.

- Massa, J., Gomes, H., Tartter, V., Wolfson, V., & Halperin, J. M. (2008). Concordance rates between parent and teacher clinical evaluation of language fundamentals observational rating scale. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 43, 99-110.
- Nergard-Nilssen, T. (2006). Longitudinal case-studies of developmental dyslexia in Norwegian. *Dyslexia*, 12, 231-255.
- Petersson, K. M., Silva, C., Castro-Caldas, A., Ingvar, M., & Reis, A. (2007). Literacy: A cultural influence on functional left-right differences in the inferior parietal cortex. *European Journal of Neuroscience*, 26, 791-799.
- Rösler, F., Heil, M., & Röder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology*, 45, 109-141.
- Rossion, B., & Pourtois, G. (2001). Revisiting Snodgrass and Vanderwart's object database: Color and texture improve object recognition. *Journal of Vision*, 1, 413-413.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.
- Waber, D. P., Wolff, P. H., Forbes, P. W., & Weiler, M. D. (2000). Rapid automatized naming in children referred for evaluation of heterogeneous learning problems: How specific are naming speed deficits to reading disability? *Child Neuropsychology*, 6, 251-261.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1989). Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, 26, 452-467.

Footnotes

¹ Negativity in the ERP usually is understood as an increase of neural activity in the underlying cortex (Rösler, Heil, & Röder, 1997).

Figure Captions

Figure 1: An example of the used stimuli. The stimulus presented on the right is a mirror image of the left and rotated 150° counterclockwise.

Figure 2: RT as a function of angular disparity for the three different age groups. Standard errors of the mean are depicted.

Figure 3: Grand average event-related potentials at parietal electrodes as a function of angular disparity for the three age groups. Stimulus presentation was at 0 ms. Negativity is plotted upwards.

Figure 1:

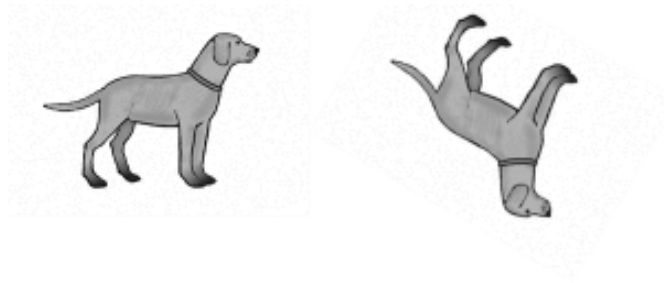


Figure 2:

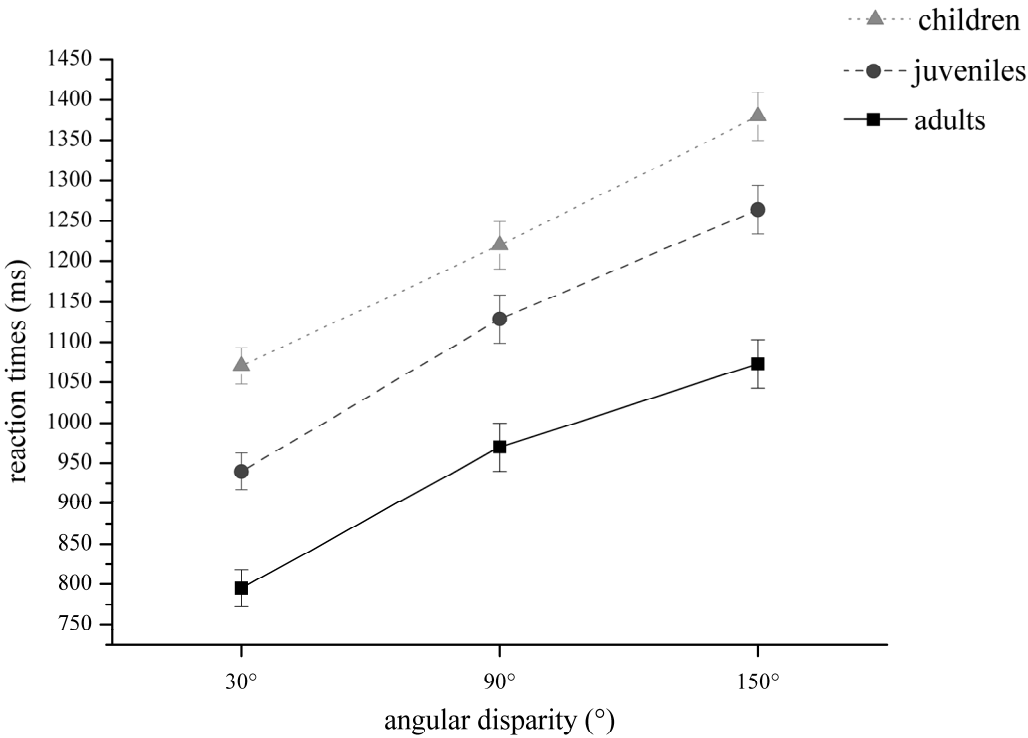
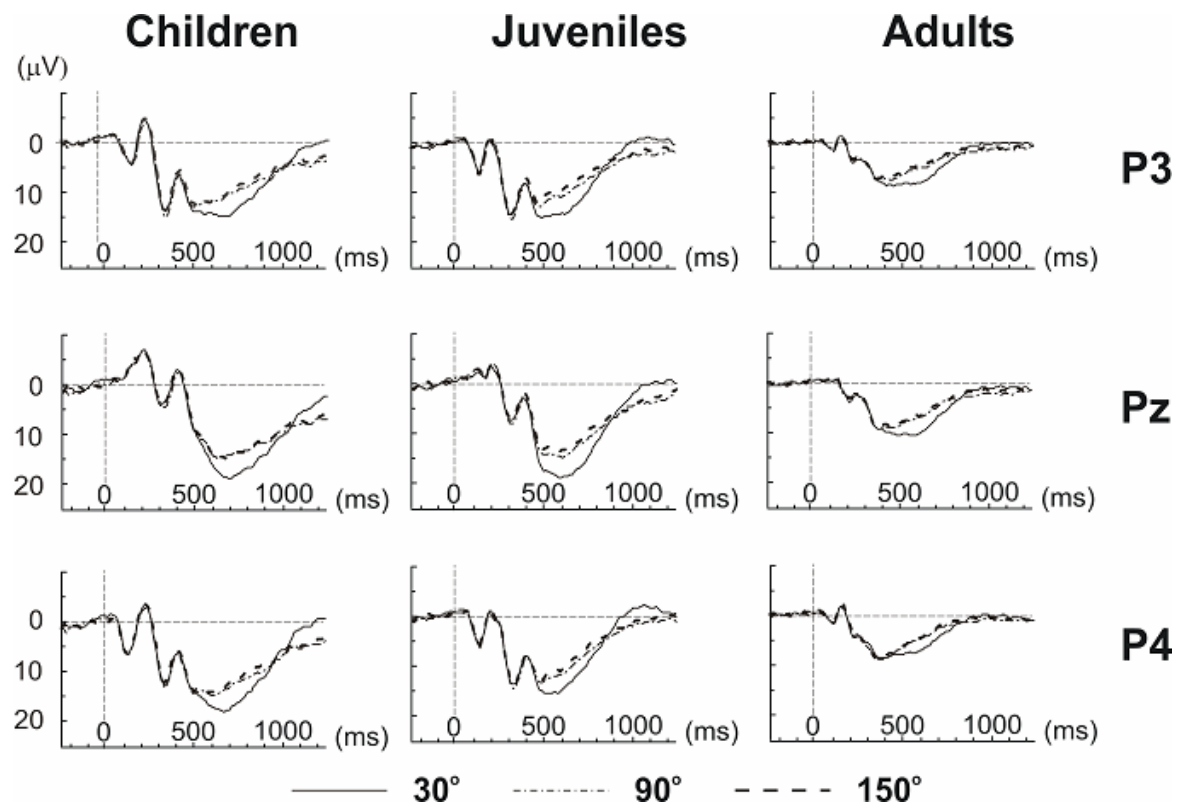


Figure 3:



Running head: Amplitude modulation during mental rotation

The amplitude modulation during mental rotation is not stimulus specific

Léonie F. Lange¹, Martin Heil¹, & Petra Jansen²

¹ Institute of Experimental Psychology, Düsseldorf

² Institute of Sport Science, University of Regensburg

Corresponding author:

Léonie F. Lange,

Institute of Experimental Psychology,

Heinrich-Heine-University, 40225 Düsseldorf, Germany.

Tel.: +49-211-811-4568

Fax: +49-211-811-3490

Email: LeonieF.Lange@uni-duesseldorf.de

Key words: mental rotation, ERPs, training, cognition, developmental cognitive neuroscience

Abstract

Different studies have shown that there is an amplitude modulation of the P300 depending on the angular disparity during mental rotation performance. But, almost all of these studies used characters as stimulus material. Studies with different stimuli are rare and sometimes make arguable assumptions. In the present experiment 30 subjects had to mentally rotate PMA-figures, of which one half had been learned during paper-and-pencil-tasks in their upright position before. We show that even with this stimulus material the well known ERP-effect appears and also provide evidence that a training of the stimulus material affects the amplitude of the P300.

Mental rotation is an aspect of spatial abilities, and according to Linn and Petersen (1985) it constitutes the most important one. The continuous and analog (e.g. Cooper, 1976; Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1997) process of mental rotation makes it possible to imagine how objects look in different orientations. In tasks requiring mental rotation, subjects have to “mentally rotate” an internal presentation of a visual stimulus into congruence with another visual stimulus (or a representation in memory) and afterwards compare the two representations for a match or a mismatch in shape. The time required to determine whether the two stimuli are the same in shape or mirror images of each other increases linearly with their angular disparity (Shepard & Metzler, 1971). This was shown for different stimuli. Kail, Pellegrino and Carter (1980; see also Blough & Slavin, 1987; Voyer & Bryden, 1990), have demonstrated this effect with stimuli out of the primary mental abilities test (PMA-stimuli; Thurstone, 1958).

The cognitive process of mental rotation seems to be implemented in the parietal cortex. An activation of the parietal leads during mental rotation was shown consistently in studies using functional magnetic resonance tomography (fMRT; e.g. Cohen, Kosslyn, Breiter, & DiGirolamo, 1996; Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001), positron emission tomography (PET; e.g. Papanicolaou, Deutsch, Bourbon, Will, Loring, & Eisenberg, 1987) and electrophysiological methods like event-related potentials (ERPs; e.g. Gill, O’Boyle, & Hathaway, 1998), as well as in studies examining the consequences of different brain-lesions (e.g. Ditunno & Mann, 1990).

Furthermore, a number of studies with adults concerning the electrophysiological correlates of mental rotation have shown a systematical association of the process of mental rotation and certain characteristics in the amplitude of the ERPs extracted from the EEG: There is a positive component, appearing 300 to 900 ms after stimulus presentation (Rugg & Coles, 1995), whose amplitude is inversely related to the orientation of the presented stimulus. This means the larger the angular disparity of the stimulus the more negative the

amplitude (Perronet & Farah, 1989; Rösler, Schumacher, & Sojka, 1990; Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989).

It is assumed that this amplitude-modulation originates from the superposition of two functionally independent brain potentials (Wijers et al., 1989; Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1996). A pronounced positive component (P300), caused by the presentation and classification of the stimulus (see e.g. Johnson, 1986), and a slow negative potential, evoked by the process of mental rotation, taking place simultaneously and superimposing this positivity.

In a number of studies it was shown that the amplitude modulation during mental rotation indeed can be attributed to the process of mental rotation itself and not to other processes required to deal with the task (for an overview see Heil, 2002): First, it was shown that the amplitude modulation is absent if the task can be solved without mental rotation. For example, Corballis and Nagourney (1978) as well as Heil et al. (1996) proved that reaction times (RTs) were independent on the character's orientation, if the subjects just had to classify the presented character as either a digit or a letter. No mental rotation is required in such classification tasks and therefore no amplitude modulation as a function of character orientation was present. This result was also validated by Heil, Rauch, and Hennighausen (1998) with two alternatives forced choice (2AFC) go-nogo tasks.

Second, just processing the difficulty information of a task does not evoke an amplitude modulation. A presentation of a rotated stimulus not only provokes the process of mental rotation itself, it also gives information about the difficulty of the task. Both aspects are perfectly confounded. In the study of Bajric, Rösler, Heil, and Hennighausen (1999) these confounded aspects were separated. The results clearly showed that the amplitude modulation is specific to the process of mental rotation and not an overall effect of increasing difficulty.

Further evidence that the amplitude modulation during mental rotation can indeed be attributed to the rotation process came from studies concerning the temporal relationship

between mental rotation and the amplitude modulation. If it is true that the amplitude modulation reflects the process of mental rotation, then the onset of the amplitude modulation logically reflects the onset of the mental rotation process. Therefore postponing the process of mental rotation by prolonging perceptual encoding or identification and discrimination of the character (see e.g. Corballis, 1988; Shepard & Cooper, 1982) should delay the onset of the amplitude modulation. The experiments of Heil and Rolke (2002) fully confirmed this point.

Furthermore, Nuñez-Peña, Aznar, Linares, Corral, and Escera (2005) were able to demonstrate that a manipulation of the perceived rotation affects the mental rotation process and the rotation-related negativity as well. If the process of mental rotation was facilitated by slowly rotating the stimulus in its canonical position, the ERPs turned out to be less negative.

Taken all these studies together, the amplitude modulation can be considered as a neurophysiological indicator of the cognitive process of mental rotation. But all studies only used characters or letter-like shapes as stimulus material to prove that amplitude modulation depends on the angular disparity. For example, Milivojevic, Johnson, Hamm, and Corballis (2003) compared the scalp topographies of the amplitude modulation during mental rotation and mental paper folding, Muthukumaraswamy, Johnson and Hamm (2003) during mental rotation and mental size transformation and Rösler et al. (1990) during mental rotation and mental arithmetic. Hamm, Johnson and Corballis (2004) examined the differences in RTs and amplitudes between normal and backward presented stimuli. A comparison of the amplitudes during mental rotation of men and women was drawn by Gootjes, Bruggeling, Magnée, and Van Strien (2008) as well as by Johnson, McKenzie and Hamm (2002), who also examined the effect of the use of the dominant vs non-dominant hand. Jansen-Osmann and Heil (2007a) have shown that the amplitude effect was also present for children and juveniles. All these studies used characters as stimuli.

Only a few studies used stimuli different than characters. E.g. Nuñez-Peña et al. (2005) were able to find the amplitude effect during mental rotation with letter-like shapes,

Pierret, Peronnet, and Thevenet (1994) with polygons, Johnson, Cox, and Fedio (1987) as well as Thayer and Johnson (2006) with outline drawings of hands and Wilson, Swain, and Davis (1994) with histograms. Overney, Michel, Harris, and Pegna (2005) used human body stimuli. Wegesin (1998), who examined the ERP-differences during mental rotation between homo- and heterosexuals, used 3-D figures and Yoshino, Inoue, and Suzuki (2000) 2D-shapes.

Unfortunately, most of the just mentioned studies did not manipulate angular disparity systematically with more than two levels. For example, Wegesin (1998) collapsed items rotated 60° and 100° into “small rotations” and items rotated 140° and 180° into “large rotations”. Yoshino et al. (2000) just compared “narrow” and “wide” angular disparities. In the study of Johnson et al. (1987) the stimuli were either presented upright (0°) or upside down (180°) and Thayer and Johnson (2006) collapsed data into “baseline” and “rotation” ERPs. Furthermore, in the study of Overney et al. (2005) just parts of each picture were rotated.

That the “rotation negative shift” is also existent with PMA-figures as stimuli was shown by Ruchkin, Johnson, Canoune, and Ritter (1991). They compared the amplitude-modulations during arithmetic or a mental rotation task at two levels of difficulty and provided evidence that “several late posterior negativities were sensitive to type of task and/or task difficulty”. However, only males were participating in their study and with regard to the well known gender differences in mental rotation (e.g. Linn & Petersen, 1985; but see also Jansen-Osmann & Heil, 2007b), this is a considerable shortcoming. Besides this, only “large” and “small” angles of rotation were analyzed.

Desrocher, Smith, and Taylor (1995) compared the amplitudes of PMA-figures with those of characters and found different topographies. But they performed peak detection instead of area measures, which was done in all the studies mentioned above, demonstrating that the amplitude modulation is a function of the angular disparity.

The shortcomings in the above mentioned studies, concerning the effect of amplitude modulation during mental rotation with different stimuli than letters, reveals the need of further research according to this topic. So, one goal of the present study was to add new evidence to support the idea that the amplitude modulation of the ERPs over the parietal cortex is indeed a neurophysiological correlate of the mental rotation process by using PMA-symbols.

Moreover, as a second goal we aimed to identify the effects of stimulus familiarity on the mental rotation related amplitude modulation. Therefore, we trained participants in identifying a subset of the PMA stimuli in their *upright position only*. Ample evidence suggests that familiar stimuli evoke a more positive going P300 than new stimuli (see, e.g., Bentin, Moscovitch, & Heth, 1992; Bentin & McCarthy, 1994; Fabiani, Karis, & Donchin, 1990; Paller, 1990; Rugg & Nagy, 1989). Moreover, recent work suggests that the more similar new stimuli are to familiar stimuli, the larger the positivity (Azizian, Freitas, Parvaz, & Squire, 2006; Azizian, Freitas, Watson, & Squire, 2006). Therefore, when mental rotation was requested for PMA symbols that were trained in their upright position, we expected (a) a larger positivity than for untrained PMA symbols, and (b) the amplitude difference between trained and untrained symbols to be the larger the smaller the angular disparity from the (trained) upright position.

Methods

Participants

Thirty students of the Heinrich-Heine-University of Düsseldorf between the age of 20 and 40 years (15 males, 15 females) were participating in this study. Before starting the test, each participant was informed of the intention of the study and the procedure, i.e. an EEG-examination. They signed a declaration of consent to participate in the study and for data utilization. The subjects received a payment of 11 €. All participants had normal or normally corrected visual acuity.

Apparatus and stimuli

The experiment took place in a windowless, soundproofed and electrically shielded room of the University of Düsseldorf. The subjects sat at a distance of approximately 50 cm from a 19 inch monitor. A keyboard and an answer-pad were placed on the table in front of the monitor. The answer pad had only two buttons, a green button on the left and a red button on the right. The buttons were to be used with the left and right index-finger.

The experimental stimuli consisted of eight different PMA-symbols (symbol 1, 7, 10, 12, 14, 15 and 18 from Thurstone, 1958; see Figure 1).

Four out of the eight PMA-symbols had to be learned in their upright position by the participant by performing four different paper-and-pencil-tasks before the EEG started. Which stimuli were used in the paper-and-pencil-tasks was varied across participants, so that the learned stimuli were different for each participant. By this learning process, the participants got familiar with four of the eight PMA-symbols.

Procedure

Individual test sessions lasted about 120 minutes. At the beginning, the participants performed the paper-and-pencil tasks. The participants had to trace the four symbols in different sizes (see Figure 2) at first and then assign the symbols to different pictures (apple, ice cream, envelope and drum; see Figure 3) in the second task. These four pictures and 28 different symbols were used in the third exercise. The symbols consisted of the four learned symbols and of variations of them. The participants had to identify the correct ones and assign them to the pictures learned before (see Figure 4). The last task for the participants was to mark the learned symbols out of a number of distractors (see Figure 5). In all four tasks, the respective PMA symbols were presented only the upright position.

After placing the electrodes, the participants had to draw the learned symbols again to ensure that they still know them. Afterwards, the EEG experiment proper started. For the mental rotation task, already learned and new PMA-symbols were presented. In each trial two

drawings of the same PMA-symbol were shown next to each other. The left drawing was presented always “upright”. That is the version in which some of the symbols were learned before. The right drawing was either presented in the same version or was a mirror image of the left. Furthermore, the right drawing was rotated 30°, 90° or 150° clockwise or counterclockwise. From this follows, that none of the stimuli to be rotated in the mental rotation task was presented in the orientation in which it was previously learned in the paper-and-pencil-tasks. Each trial started with the appearance of a fixation point in the center of the screen. One second later the two PMA-drawings were presented. The drawings remained on screen until the participant decided if the two drawings were same or mirror-images of each other by pressing either the green (“same”) or the red (“different”) answer-pad button. Participants were told to respond as quickly and as accurately as possible. Additionally, the participants were instructed to avoid eye movements as well as other body movements during the experiment. To indicate if the response was correct (incorrect) a + (-) was displayed for 500 ms. Trials were separated by varying intervals of 1 to 2 seconds. After a block of 48 trials each participant could choose a short break. They were asked to start the new block by pressing a button of the answer-box. Each combination of symbols (eight different drawings), version (normal or mirror-image) and orientation (30°, 90°, 150° clockwise or counterclockwise) was presented four times during the test, which resulted in a total number of 384 trials. In order to make the participants familiar with the test-sequence, 24 unrecorded practice trials were added at the beginning of the experiment.

EEG-analysis

The EEG was recorded monopolarly by the Neuroscan-Aquire-Program and with AgAgCl-electrodes. According to the 10-20-system of Jasper (1958) the electrodes Fz (midline frontal), Cz (midline central), Pz (midline parietal), P3 (left parietal) and P4 (right parietal) were used. The study was limited to these five scalp-electrodes, because former studies showed the specific mental rotation effect to be maximal at these three parietal leads

(Heil, Rauch, & Hennighausen, 1998; Heil, 2002). Digitally averaged earlobes served as reference. The horizontal (hEOG) and the vertical (vEOG) electroencephalogram were taken as bipolar channels. The left mastoid served as ground. Electrode impedance was kept below 5 k Ω . Band pass was set from DC to 40 Hz; the digitalization rate was 250 Hz. Additionally, a DC correction was conducted according to the method of Hennighausen, Heil, and Rösler (1993). All trials were inspected off-line and those contaminated with artifacts like eye-blinks or other body movements were rejected. Subjects with more than 30% of the trials contaminated with artifacts were completely excluded from the study. From the edited set of raw data, we extracted ERPs by averaging single trials with correct responses separately for participants and electrodes.

Statistical analysis

RTs and error rates were tested statistically in an analysis of variance (ANOVA) including the within-subjects factors of training (trained vs. untrained objects) and orientation (30°, 90°, and 150°). All ANOVAs were first calculated with the additional factor of sex as a between-subjects factor. Because this factor did not result in any reliable main effect or interactions, this factor was not regarded further. For the ERPs, the average amplitude of the epoch 500-800 ms after stimulus presentation was used as the dependent variable, with reference to a pre-stimulus baseline of 125 ms duration. Statistical effects were tested in an ANOVA including the within-subject factors training, orientation and electrode position (Fz, Cz, P3, Pz, P4). Again, the between-subject factor sex was not statistically significant in any analysis. The significance levels of all analyses of variance results were corrected according to the method of Huynh and Feldt (1976) to compensate for nonshphericity of the data.

Results

Behavioral data

Only trials with correct response were used for RT and error analyses. Furthermore, the statistical analyses presented were restricted to “same” responses only, because angular

disparity is not defined unequivocally for "different" responses (see, e.g., Jolicoeur, Regehr, Smith, & Smith, 1985). Prior to analyses, RT data were trimmed. RTs more than 1 SDs above or below the mean per subject were excluded for the RT analysis.

RTs served as a manipulation check to validate that subjects indeed were using mental rotation to solve the task (see Figure 6). We found significant main effects of orientation, $F(2, 58) = 83.74, p < .01$ and of training, $F(1, 29) = 4.73, p < .05$. There was no interaction of both factors $F(2, 58) = 2.23, n.s.$ Considered separately, the effect of training existed for stimuli rotated 30° and 90° , $F(1, 29) = 5.89$ and $5.04, p < 0.5$, respectively. For stimuli rotated 150° no effect of training was observed, $F(1, 29) = 1.46, n.s.$

As well as the RTs, the error-rates increased with increasing angular disparity, $F(2, 58) = 33.66, p < .01$. But there was neither a main effect of the factor training, $F(1, 29) = 0.76, n.s.$, nor an interaction of the factors training and orientation $F(2, 58) = 0.48, n.s.$ Table 1 shows the RTs, error-rates and mean amplitudes (P3, P4, Pz) for the three different angles of rotation and the two learning-conditions.

ERPs

The effect of orientation was observed at all five scalp-electrodes, with most pronounced effects at the parietal leads. The mental rotation of the PMA-figures evoked a large positivity (see Figure 7). At the three parietal electrodes, the amplitude of the positivity decreased with increasing angular disparity; $F(2, 58) = 44.25, p < .01$. There was also a significant main effect of the factor electrode ($F(2,58) = 15.15, p < .01$), but there was no interaction with the factors orientation ($F(4,116) = 2.468, n.s.$) or training ($F(2,58) = .253, n.s.$).

The effect of training was existent at all five scalp-electrodes. At the parietal leads it was most considerable; $F(1,29) = 8.97, p < .01$. Besides this the interaction of the factors orientation and training turned out to be significant; $F(2,58) = 3.92, p < .05$. We further examined this interaction by separately analyzing the three different angles of rotation. There

was only an effect of training in the 30° condition, $F(1,29) = 16.92, p < .01$. Taking only the 90° and the 150° condition into account there still was a main effect of orientation ($F(1,29) = 11.14, p < .01$), but no effect of training ($F(1,29) = 1.87, n.s.$) and no interaction of both factors ($F(1,29) = 0.07, n.s.$).

Discussion

First of all, the amplitude modulation as a function of angular displacement was replicated even though PMA-figures were used as stimulus material. Thus, the amplitude modulation is in fact even present if stimuli different than letters were used. Therefore, the amplitude modulation of the ERPs over the parietal cortex should indeed be understood as a neurophysiological correlate of the mental rotation process.

The training of the stimulus identification and classification for a subset of the PMA symbols indeed had an effect on both the behavioral data and the ERPs. If the PMA-figures were trained, RTs decreased. This effect reached significance in the 30° and 90° condition, with the most pronounced effect at 30°. Concerning our ERP data, there was an influence of the training on the shape of the P300. In the 30° condition the amplitude of the P300 evoked by the trained stimuli was significantly more positive going than the amplitude evoked by the untrained stimuli. For the 90° and 150° condition, however, the (relative) negativity was independent of the training. A categorical influence of simplified stimulus identification and categorization would be an explication for that pattern of result.

The training was fully restricted to stimuli in their upright orientation. As a consequence, the processes of stimulus identification and classification were trained but not the process of mental rotation proper. Training of mental rotation itself by repeating the mental rotation task yielded RT decreases that were specific for the stimuli trained in the orientation trained: Tarr and Pinker as well as Heil, Rösler, Link, and Bajric (1998) examined the effects of practice on mental rotation by means of RT data. Tarr and Pinker (1989) used letter-like shapes; Heil, Rösler, et al. (1998) had training with 3D-block figures (Shepard &

Metzler, 1971). Both studies demonstrated that the practice effects were specific to the trained objects and their trained orientations. This means the training only had an effect if the objects were presented in exactly the same angular disparities as before. These data suggest that practice might cause a replacement of the time-consuming mental rotation process by a fast memory retrieval process.

Our RT data suggest that a training of stimulus identification and classification improves these processes the more the more similar the test stimulus is, i.e., the smaller its angular disparity. This would suggest a continuous effect of similarity in line with Azizian, Freitas, Parvaz, and Squires (2006) and Azizian, Freitas, Watson, and Squires (2006). The ERP data, however, would suggest a more categorical effect of the training: The ERP amplitude is affected if the test stimulus is similar to the trained one (i.e., if angular disparity between training and test stimulus is only 30°) but is unaffected if the test stimulus is dissimilar to the trained one (i.e., if angular disparity between training and test stimulus 90° or higher). More data are needed to learn more about this discrepancy. It might simply be caused by differences in sensitivity between RT and ERP data. It might also be possible that RT and ERP data reflect different sources of training effects as a function of similarity.

References

- Azizian, A., Freitas, A. L., Parvaz, M. A., & Squires, N. K. (2006). Beware misleading cues: Perceptual similarity modulates the N2/P3 complex. *Psychophysiology*, *43*, 253-260.
- Azizian, A., Freitas, A. L., Watson, T. D., & Squires, N. K. (2006). Electrophysiological correlates of categorization: P300 amplitude as index of target similarity. *Biological Psychology*, *71*, 278-288.
- Bajric, J., Rösler, F., Heil, M., & Hennighausen, E. (1999). On separating processes of event categorization, task preparation, and mental rotation proper in a handedness recognition task. *Psychophysiology*, *36*, 399-408.
- Bentin, S., Moscovitch, M., & Heth, I. (1992). Memory with and without Awareness - Performance and Electrophysiological Evidence of Savings. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*, 1270-1283.
- Bentin, S., & McCarthy, G. (1994). The Effects of Immediate Stimulus Repetition on Reaction-Time and Event-Related Potentials in Tasks of Different Complexity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 130-149.
- Blough, P. M., & Slavin, L. K. (1987). Reaction time assessments of gender differences in visual-spatial performance. *Perception and Psychophysics*, *41*, 276-281.
- 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. *Brai* *119*, 89-100.
- Cooper, L. A. (1976). Demonstration of a mental analog of an external rotation. *Perception and Psychophysics*, *19*, 296-302.
- Corballis, M. C. (1988). Recognition of disoriented shapes. *Psychological Review*, *95*, 115-123.
- Corballis, M. C., & Nagourney, B. A. (1978). Latency to categorize disoriented alphanumeric characters as letters or digits. *Canadian Journal of Psychology* *32*, 186-188.

- Desrocher, M. E., Smith, M. L., & Taylor, M. J. (1995). Stimulus and sex differences in performance of mental rotation: Evidence from event-related potentials. *Brain and Cognition*, 28, 14-38.
- Ditunno, P. L., & Mann, V. A. (1990). Right hemisphere specialization for mental rotation in normals and brain damaged subjects. *Cortex*, 26, 177-188.
- Fabiani, M., Karis, D., & Donchin, E. (1990). Effects of mnemonic strategy manipulation in a Von Restorff paradigm. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75, 22-35.
- Gill, H. S., O'Boyle, M. W., & Hathaway, J. (1998). Cortical distribution of EEG activity for component processes during mental rotation. *Cortex*, 34, 707-18.
- Gootjes, L., Bruggeling, E. C., Magnée, T., & Van Strien, J. W. (2008). Sex differences in the latency of the late event-related potential mental rotation effect. *Neuroreport*, 19, 349-353.
- Hamm, J. P., Johnson, B. W., & Corballis, M. C. (2004). One good turn deserves another: An event-related brain potential study of rotated mirror-normal letter discriminations. *Neuropsychologia*, 42, 810-820.
- Heil, M. (2002). The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 535-545.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1996). Event-related potentials during mental rotation: Disentangling the contributions of character classification and image transformation. *Journal of Psychophysiology*, 10, 326-335.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 681-692.

- Heil, M., Rauch, M., & Hennighausen, E. (1998). Response preparation begins before mental rotation is finished: Evidence from event-related brain potentials. *Acta Psychologica*, 99, 217-232.
- 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.
- Heil, M., & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414-422.
- Hennighausen, E., Heil, M., & Rösler, F. (1993). A correction method for DC drift artefacts. *Electroencephalography and Clinical Neuropsychology*, 86, 199-204.
- Huynh, H., & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box correction for degrees of freedom from sample data in randomized block and split-plot designs. *Journal of Educational Statistics*, 1, 69-82.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007a). Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *Neuroreport*, 18, 175-178.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007b). Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain and Cognition*, 64, 217-227.
- Jasper, H. (1958). The ten twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neuropsychology*, 10, 371-35.
- Johnson, B. W., McKenzie, K. J., & Hamm, J. P. (2002). Cerebral asymmetry for mental rotation: Effects of response hand, handedness and gender. *Neuroreport*, 13, 1929-1932.
- Johnson, R. (1986). A Triarchic Model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, 23, 367-384.
- Johnson, R., Jr., Cox, C., & Fedio, P. (1987). Event-related potential evidence for individual

- differences in a mental rotation task. In R. Johnson, J. W. Rohrbaugh, & P. Parasuraman (Eds.), *Current trends in event-related potential research* (pp. 191-197). Amsterdam: Elsevier.
- Jolicoeur, P., Regehr, S., Smith, L. B. J. P., & Smith, G. N. (1985). Mental Rotation of Representations of Two-Dimensional and 3-Dimensional Objects. *Canadian Journal of Psychology*, 39, 100-129.
- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M., & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, 13, 143-52.
- Kail, R., Pellegrino, J., & Carter, P. (1980). Developmental changes in mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 102-116.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479-1498.
- Milivojevic, B., Johnson, B. W., Hamm, J. P., & Corballis, M. C. (2003). Non-identical neural mechanisms for two types of mental transformation: Event related potentials during mental rotation and mental paper folding. *Neuropsychologia*, 41, 1345-1356.
- Muthukumaraswamy, S. D., Johnson, B. W., & Hamm, J. P. (2003). A high density ERP comparison of mental rotation and mental size transformation. *Brain and Cognition*, 52, 271-280.
- Nuñez-Peña, M. I., Aznar, J. A., Linares, D., Corral, M. J., & Escera, C. (2005). Effects of dynamic rotation on event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, 24, 307-316.
- Overney, L. S., Michel, C. M., Harris, I. M., & Pegna, A. J. (2005). Cerebral processes in mental transformations of body parts: Recognition prior to rotation. *Cognitive Brain Research*, 25, 722-734.

- Paller, K. A. (1990). Recall and stem-completion priming have different electrophysiological correlates and are modified differentially by directed forgetting. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 1021-1032.
- Papanicolaou, A. C., Deutsch, G., Bourbon, W. T., Will, K. W., Loring, D. W., & Eisenberg, H. M. (1987). Convergent evoked potential and cerebral blood flow evidence of task-specific hemispheric differences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66, 515-520.
- Peronnet, F., & Farah, M. J. (1989). Mental rotation: An event-related potential study with a validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, 9, 279-288.
- Pierret, A., Peronnet, F., & Thevenet, M. (1994). An electrophysiological study of the mental rotation of polygons. *Neuroreport*, 5, 1153-1156.
- Rösler, F., Schumacher, G., & Sojka, B. (1990). What the brain reveals when it thinks: Event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *German Journal of Psychology*, 14, 185-203.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Canoune, H., & Ritter, W. (1991). Event-related potentials during arithmetic and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 79, 473-487.
- Rugg, M. D., & Coles, M. G. H. (1995). The ERP and cognitive psychology: Conceptual issues. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event related brain potentials and cognition*. (pp. 27-39). London: Oxford University Press.
- Rugg, M. D., & Nagy, M. E. (1989). Event-related potentials and recognition memory for words. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 72, 395-406.
- Shepard, R. N., & Cooper, L. A. (1982). *Mental images and their transformation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.

- Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology*, 21, 233-282.
- Thayer, Z. C., & Johnson, B. W. (2006). Cerebral processes during visuo-motor imagery of hands. *Psychophysiology*, 43, 401-412.
- Thurstone, T. G. (1958). *Manual for the SRA primary mental abilities*. Chicago: Science Research Associates.
- Voyer, D., & Bryden, M. P. (1990). Gender, level of spatial ability, and lateralization of mental rotation. *Brain and Cognition*, 13, 18-29.
- Wegesin, D. J. (1998). Event-related potentials in homosexual and heterosexual men and women: Sex-dimorphic patterns in verbal asymmetries and mental rotation. *Brain and Cognition*, 36, 73-92.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1989). Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, 26, 452-467.
- Wilson, G. F., Swain, R. A., & Davis, I. (1994). Topographical analysis of cortical evoked activity during a variable demand spatial processing task. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 65, 54-61.
- Yoshino, A., Inoue, M., & Suzuki, A. (2000). A topographic electrophysiologic study of mental rotation. *Cognitive Brain Research*, 9, 121-124.

Table 1

RTs, error-rates and mean amplitudes (P3, P4, Pz) for the three different angles of rotation and the two learning-conditions.

		RT in ms	error-rate in %	mean amplitude in μV		
				P3	P4	Pz
trained	30°	1108	3.23	4.03	4.58	6.74
	90°	1371	4.69	1.11	2.05	3.64
	150°	1692	7.19	0.06	0.70	2.65
untrained	30°	1235	2.24	2.04	2.35	4.69
	90°	1489	4.17	0.57	1.32	2.93
	150°	1750	7.19	-0.53	0.39	1.97

Figure Captions

Figure 1: The 8 different PMA-symbols (symbol 1, 7, 10, 12, 14, 15 and 18 from Thustone, 1958) used as stimulus-material.

Figure 2: First exercise (“tracing in different sizes”).

Figure 3: Second exercise (“assigning to symbols”)

Figure 4: Third exercise (“assigning the right symbols”)

Figure 5: Fourth exercise (“distractors”)

Figure 6: RTs as a function of the angular disparity for the two learning-conditions. Standard errors of the mean are depicted.

Figure 7: Grand average event-related potentials at parietal electrode sites as a function of stimulus orientation for the three age groups. Stimulus presentation was at 0 ms. Negativity is plotted upwards.

Figure 1:

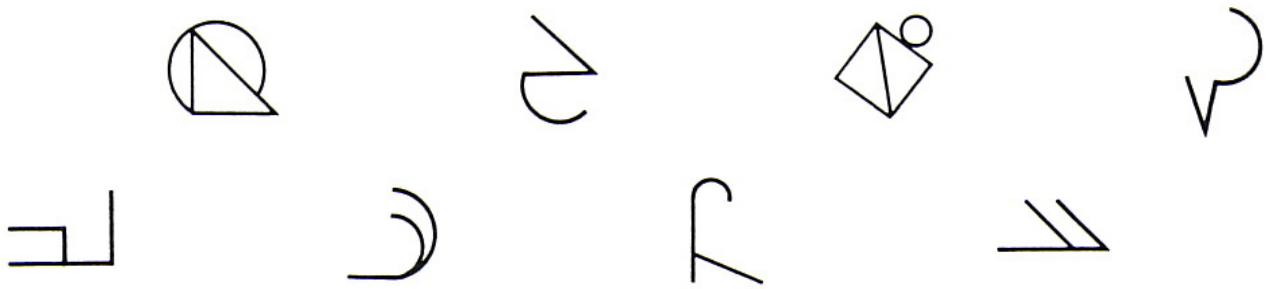


Figure 4:

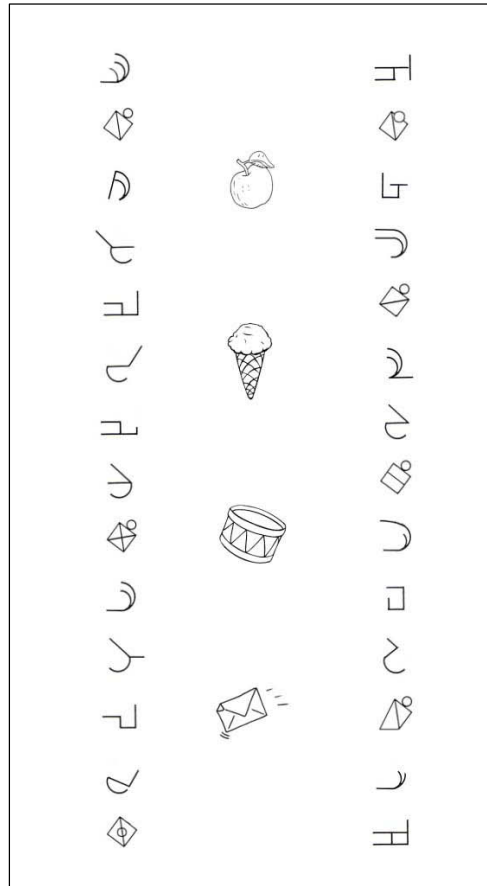


Figure 5:

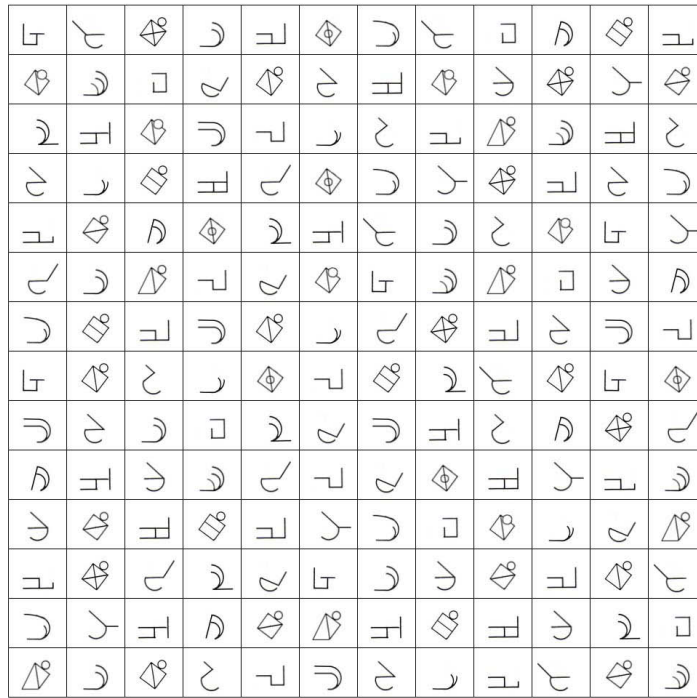


Figure 6:

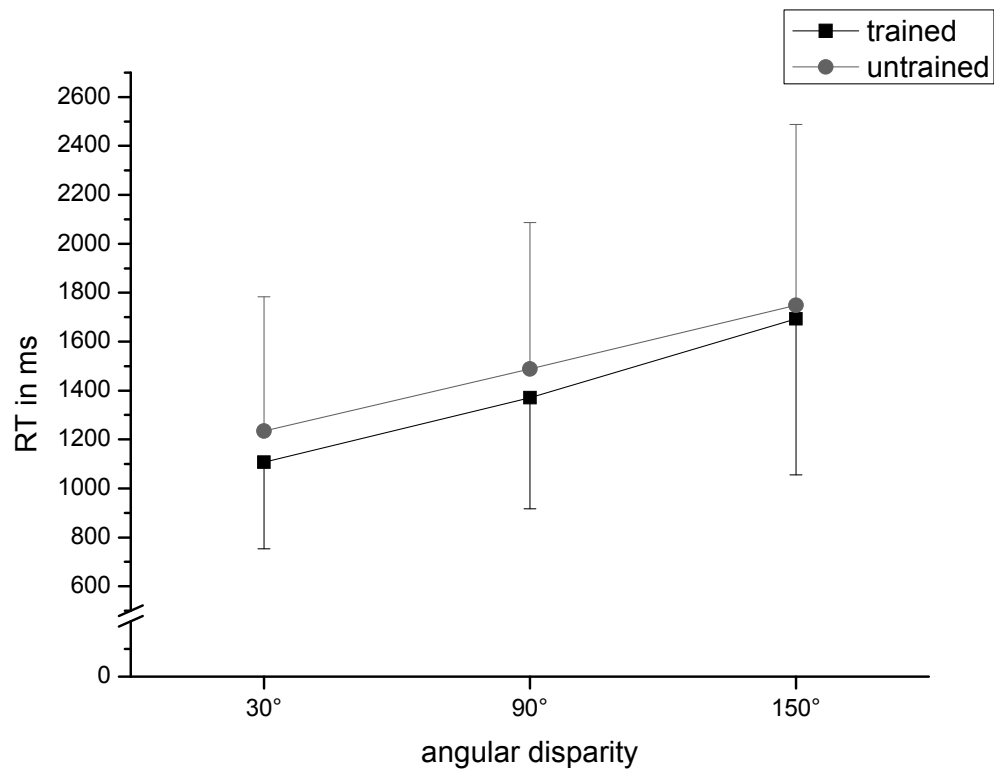
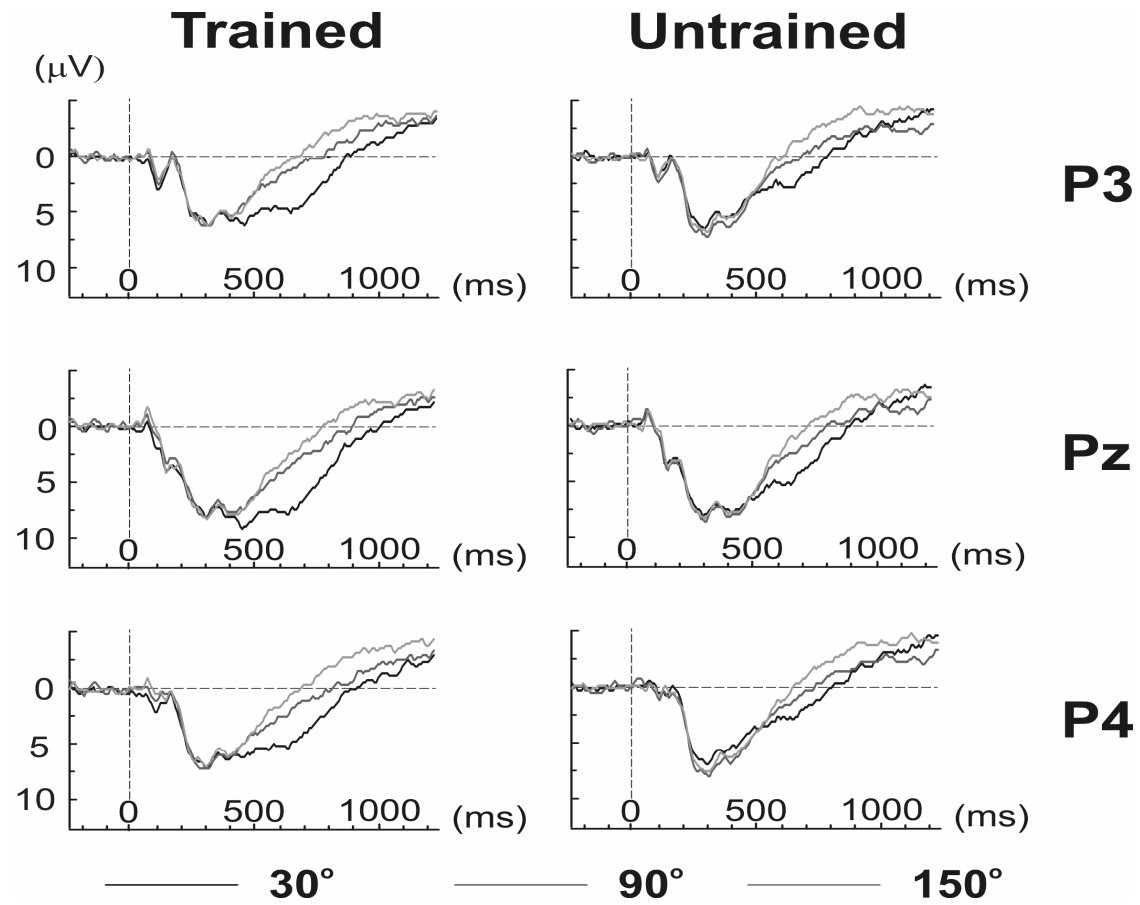


Figure 7:



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir während meines Studiums und beim Erreichen der Promotion zur Seite gestanden und geholfen haben.

Mein fachlicher Dank geht an erster Stelle an Prof. Dr. Heil, der mich immer gut betreut und auch in schwierigen Phasen den Überblick behalten hat.

Frau Prof. Dr. Jansen möchte ich dafür danken, dass sie mir schon früh die Möglichkeit gegeben hat wissenschaftliches Arbeiten zu erlernen, und dass ich mit jeglicher Fragestellung zu ihr kommen konnte.

Weiterhin bedanke ich mich bei den wissenschaftlichen Hilfskräften für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und bei allen Teilnehmern, die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Ein ganz besonderer, persönlicher Dank geht an meine Familie, d. h. meine Mutter und meine Geschwister Sarah, Raphael und Aaron. Sie geben mir Rückhalt und Vertrauen und motivieren mich, meinen Weg zu gehen.

Zu guter Letzt möchte ich Markus danken. – Danke, dass du mir so zur Seite stehst und mich immer wieder meinen Stress hast vergessen lassen.

Erklärung

Die hier vorliegende 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

(Léonie F. Lange)