



Mentale Rotation bei Vorschulkindern: Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung

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

vorgelegt von
Nicola Hahn
geboren in Münster

Düsseldorf, Oktober 2010

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

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

Referentin: Prof. Dr. Petra Jansen

Koreferent: Prof. Dr. Martin Heil

Tag der mündlichen Prüfung: 05.11.2010

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	6
1 Einleitung.....	7
1.1 Das Paradigma der Mentalen Rotation.....	9
1.2 Neurowissenschaftlicher Forschungsstand.....	10
1.2.1 Kortikale Implementierung	10
1.2.2 Lateralisierung	11
1.2.3 Kortikale Implementierung und Lateralisierung bei Kindern	12
1.3 Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede	13
1.3.1 Biologisch-neuronale Faktoren.....	14
1.3.2 Psycho-soziale Faktoren	17
1.3.2.1 Einfluss von Strategien	18
1.3.2.2 Einfluss von Stimulusmaterial.....	19
1.4 Zentrale Fragestellungen.....	21
2 Experimente	22
2.1 Mentale Rotation von Tierzeichnungen: Geschlecht und Lateralisierung.....	22
2.2 Mentale Rotation von Buchstaben: Geschlecht und Lateralisierung	24
3 Allgemeine Diskussion.....	26
3.1 Ausblick	31
3.2 Zusammenfassende Thesen.....	33
4 Literatur	34
5 Einzelarbeiten.....	46

Zusammenfassung

Die Mentale Rotation gehört zu der Kategorie von räumlich kognitiven Aufgaben, bei denen immer wieder große Geschlechtsunterschiede zugunsten von Männern gefunden wurden und die zudem durch Unterschiede in der hemisphärischen Asymmetrie zwischen den Geschlechtern gekennzeichnet sind (z.B. Hugdahl, Thomsen, & Ersland, 2006). Obwohl vor etwa einem Jahrzehnt die Überlegenheit des männlichen Geschlechts bereits im Alter von etwa viereinhalb Jahren nachgewiesen werden konnte (Levine, Huttenlocher, Taylor, & Langrock, 1999), existierten bis heute keine Erkenntnisse darüber, ob die beobachteten Leistungsunterschiede bei Kindern auch von Unterschieden in der Lateralisierung begleitet werden. Eine weitere Frage, die in diesem Zusammenhang bisher unbeantwortet geblieben ist, ist die nach der Ursache der Geschlechtsunterschiede. Hier kommen sowohl biologische als auch soziale Erklärungsansätze in Betracht. Gerade in der jüngeren Vergangenheit wurden hormonelle Einflussfaktoren als ursächlich diskutiert, da gezeigt werden konnte, dass sich die Lateralisierung bei Frauen im Verlauf des Menstruationszyklusses verändert (z.B. Hausmann & Bayer, 2009).

Die vorliegende Arbeit hat sich speziell mit den elektrophysiologischen Korrelaten mentaler Rotation bei Kindern befasst. In einer ersten Untersuchung wurde zunächst überprüft, ob sich die in Studien mit Erwachsenen gezeigten Lateralisierungsunterschiede bereits im Vorschulalter finden lassen. Es zeigten sich einerseits, wie erwartet, bessere Leistungen der Jungen hinsichtlich der Fehlerrate und andererseits Unterschiede in der Lateralisierung zwischen den Geschlechtern. Während der mentalen Rotation wurde bei Jungen eine bilaterale Hirnaktivität beobachtet, Mädchen zeigten hingegen eine deutliche linkshemisphärische Aktivität. Die Frage, ob sich die gefundenen Lateralisierungsunterschiede auch mit für diese Altersgruppe schwierigerem Stimulusmaterial replizieren lassen, wurde in einer zweiten Studie untersucht. In dieser wurden Buchstaben anstatt Tierzeichnungen als Stimulusmaterial verwendet. Hinsichtlich der Leistung unterschieden sich Mädchen und Jungen nicht voneinander, die bereits in der ersten Studie gefundenen Unterschiede in Bezug auf die Hirnaktivität zeigten sich

jedoch auch in dieser Untersuchung. Während hinsichtlich der rechten Hemisphäre keine Aktivierungsdifferenzen zwischen den Geschlechtern festgestellt werden konnten, zeigten sich linksseitig deutliche Unterschiede. Folglich sind für Geschlechtsunterschiede in Bezug auf die Hirnaktivität nicht diejenigen hormonellen Veränderungen erforderlich, die erst mit Beginn der Pubertät auftreten. Diese Ergebnisse können als weitere Evidenz für einen essentiellen Anteil biologisch-neuronaler Faktoren an den Geschlechtsunterschieden betrachtet werden.

Abstract

Mental rotation performance has been found to produce one of the largest sex differences in cognition favouring men, accompanied by sex differences in functional cerebral asymmetry (e.g. Hugdahl, Thomsen, & Ersland, 2006). Although one decade ago the male advantage could be demonstrated as early as age five (Levine, Huttenlocher, Taylor, & Langrock, 1999), until today no results exist whether the differences in performance of children are accompanied by differences in hemispheric asymmetry, too. Another question that has to be answered is the question about the causes for the sex effect. Both, biological as well as social explanations, can quote empirical support. In the recent past hormonal changes have been discussed, based on the observation that cerebral asymmetries vary in cycling women (e.g. Hausmann & Bayer, 2009). The current work deals with the electrophysiological correlates of mental rotation in children. In the first study, it was examined whether differences in functional cerebral asymmetry, revealed in adults, could also be found in preschoolers. On the one hand, as expected, superior performance of boys with respect to error rate was found. On the other hand differences in lateralisation between the sexes were observed. During mental rotation boys showed a bilateral brain activity, whereas girls' brain activity was clearly lateralised towards the left hemisphere. The question whether the differences in hemispheric asymmetry found, could be replicated with more difficult stimuli in this age group has been examined in a second study, in which, in contrast to the first study, letters instead of animal drawings had been used as stimulus material. Concerning their performance girls and boys did not differ. However, the differences of brain activity found in the first study have been observed in this study, too. No differences in brain activity of the right hemisphere were present, but a clear difference in left hemisphere activation was found. Consequently, sex differences in functional cerebral asymmetry during mental rotation do not require hormonal changes that occur during puberty. These results provide further evidence for biological-neuronal explanations.

1 Einleitung

In unserem täglichen Leben spielen der Erwerb, die Verarbeitung und der Abruf räumlicher Informationen eine wichtige Rolle. Ob es beispielsweise darum geht Gegenstände aus einer ungewöhnlichen Perspektive zu erkennen oder zielgerichtet nach Objekten greifen zu können - für eine Reihe von alltäglichen Leistungen werden mentale Repräsentationen von räumlichen Informationen im Gedächtnis benötigt. Darüber hinaus ist auch in der Schule und in vielen Berufen räumlich-kognitives Können eine Voraussetzung, um erfolgreich zu sein. So hängt beispielsweise die Leistung im Mathematikunterricht u.a. von der Fähigkeit zur räumlichen Kognition ab (Casey, Nuttal, & Pezaris, 1997) und auch in Berufszweigen wie dem Ingenieurs- und Architekturwesen, der Chirurgie, der Radiologie oder der Fliegerei ist räumliches Vorstellungsvermögen unentbehrlich (z.B. Dror, Kosslyn, & Waag, 1993; Hegarty & Waller, 2005). Nach Linn und Petersen (1985) werden drei Kategorien der Raumkognition voneinander unterschieden, die räumliche Wahrnehmung, die räumliche Visualisierung und die Mentale Rotation.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte kognitive Leistung ist die Mentale Rotation. Darunter versteht man die Fähigkeit, die Repräsentation eines Reizes mental, also im Kopf, zu rotieren, um sich vorzustellen, wie ein Objekt aus einer anderen Perspektive betrachtet aussieht (Shepard & Metzler, 1971; Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1997). Innerhalb der Psychologie haben sich Untersuchungen sowohl mittels psychometrischer als auch chronometrischer Verfahren mit der mentalen Rotation beschäftigt, wobei in einer Vielzahl von Studien Geschlechtsunterschiede beobachtet wurden. Männer wiesen hier überwiegend bessere Leistungen als Frauen auf (Linn & Petersen, 1985), wobei sich die Überlegenheit des männlichen Geschlechts bereits in einem Alter von viereinhalb Jahren zeigte (Levine et al., 1999). Mögliche Erklärungen für die Geschlechtsunterschiede müssen somit auch Entwicklungsprozesse in der Kindheit mit in Betracht ziehen.

Erste Untersuchungen zum kindlichen Raumverständnis und Annahmen über die mentale Rotationsfähigkeit von Kindern finden sich in einer Arbeit von Piaget und

Inhelder (1956). Sie unterschieden zwischen statischen und kinetischen bildhaften Vorstellungen, wobei Kinder, die sich in der präoperationalen Stufe ihrer Entwicklung befinden (18/24 Monate bis vier Jahre), ihrer Ansicht nach nur über statische mentale Repräsentationen verfügen. Das heißt, dass sie weder in der Lage sind, Bewegungen zu repräsentieren, noch die Ergebnisse von Bewegungen oder räumlichen Transformationen eines Objektes antizipieren können. Diese Fähigkeit bildet sich ihrer Meinung nach erst im Alter von sieben bis acht Jahren heraus. Die Ergebnisse ihrer Arbeit wurden jedoch in den folgenden Jahrzehnten häufig in Frage gestellt (z.B. Marmor, 1975; Kosslyn, Margolis, Barrett, Goldknopf, & Daly, 1990). Spätere Studien, die auf chronometrischen Messungen beruhten, belegten, dass entgegen Piagets Postulat auch Kinder, die jünger als sieben oder acht Jahre alt waren, fähig waren Objekte mental zu rotieren (Marmor, 1975, 1977; Kosslyn et. al, 1990). Darüber hinaus konnte Estes (1998) zeigen, dass bereits sechsjährige Kinder unaufgefordert mental rotierten, wenn die Lösung einer Aufgabe dies erforderte.

Neben diesen psychologischen Studien zur mentalen Rotation befassen sich innerhalb der kognitiven Neurowissenschaften eine Reihe von Untersuchungen mit der Hemisphärenlateralisierung bei der mentalen Rotationsleistung, die jedoch eine inhomogene Datenlage ergeben. Die vorliegende Arbeit hat beide Forschungsstränge miteinander verknüpft und hierfür die Untersuchungsmethode der Elektroenzephalographie (EEG) gewählt. Dadurch, dass diese Methode vollständig nicht-invasiv ist, ist sie besonders für die Untersuchung von Kindern geeignet.

Nachfolgend wird zunächst ein Überblick über die mentale Rotation und den derzeitigen neurowissenschaftlichen Forschungsstand gegeben. Im Anschluss werden der Einfluss des Geschlechts und Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede erläutert. Aus dieser Zusammenfassung ergeben sich die zentralen Fragestellungen für die durchgeführten Studien.

1.1 Das Paradigma der Mentalen Rotation

Vor fast vierzig Jahren entwickelten Shepard und Metzler (1971) einen Untersuchungsansatz, der die experimentelle Psychologie auch heute noch stark beeinflusst. Bei ihrer Art der Untersuchung bestand die methodische Grundidee darin, Stimuli unterschiedlicher Orientierungen bezüglich ihrer Formgleichheit zu beurteilen. In ihrer ursprünglichen Studie präsentierten sie ihren Versuchspersonen paarweise Abbildungen dreidimensionaler Würfelfiguren, die entweder identisch waren oder von denen eine Figur eine gespiegelte Version der anderen war (siehe Abbildung 1). Beide Figuren waren zudem entweder in der Bildebene oder in der Bildtiefe gegeneinander rotiert. Die Winkeldifferenz zwischen den Figuren wurde in 20° Schritten variiert. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, schnell (Erfassung der Reaktionszeit) und möglichst akkurat (Erfassung der Fehlerrate) zu entscheiden, ob die gezeigten Objekte identisch oder gespiegelt waren. Im Ergebnis zeigte sich ein linearer Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Winkeldifferenz. Dies legte die Schlussfolgerung nahe, dass die Versuchspersonen eine je nach Rotationswinkel unterschiedlich lange mentale Drehung der Stimuli vorgenommen hatten, um einen Abgleich mit dem Standardreiz zu ermöglichen. Später wurde angenommen, dass die mentale Rotation eine reale Drehbewegung simuliert (z.B. Metzler & Shepard, 1982). Der erwähnte lineare Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten und der Winkeldifferenz fand sich bereits bei Kindern ab dem siebten Lebensjahr, sie rotierten jedoch langsamer als Erwachsene (Kail, Pellegrino, & Carter, 1980).

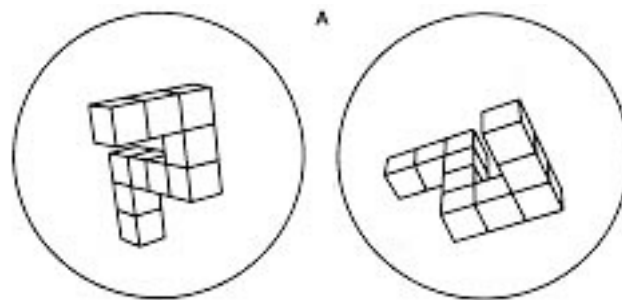


Abbildung 1: Beispiel für ein Testitem, das von Shepard und Metzler benutzten Reize.

Dieses computergestützte Paradigma nach Shepard und Metzler (1971) hat sich als Standard etabliert, wobei das Reizmaterial hinsichtlich Dimensionalität (zwei- versus dreidimensional), Komplexität (einfach versus schwierig) und Anschaulichkeit (abstrakt versus konkret) variiert wird. Das verwendete Stimulusmaterial sollte nach Courbois (2000) bei Kindern zudem derart gestaltet sein, dass die Reize deutliche Achsen besitzen, anhand derer sie erkennen können, wo sich oben und unten befindet.

1.2 Neurowissenschaftlicher Forschungsstand

In Bezug auf die Mentale Rotation sind aus neurowissenschaftlicher Perspektive insbesondere Arbeiten zur kortikalen Implementierung sowie zur Lateralisierung von Bedeutung. In Bezug auf EEG-Daten von Kindern bei mentaler Rotation existieren bisher nur verhältnismäßig wenige Untersuchungen, die sich mit dieser Thematik beschäftigen. Bevor der aktuelle Forschungsstand bezüglich dieser beiden Aspekte bei Kindern zusammengefasst wird, wird daher zunächst ein Überblick über die Datenlage bei Erwachsenen gegeben.

1.2.1 Kortikale Implementierung

Bei den Arbeiten zur kortikalen Implementierung hat sich gezeigt, dass der räumliche Transformationsprozess der mentalen Rotation mit einer Aktivierung des parietalen Kortex einhergeht. Diese Aktivierung wurde sowohl mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT; z.B. Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001) und Positronen-Emissions-Tomographie (PET; z.B. Papanicolaou, Deutsch, Bourbon, Will, Loring, & Eisenberg, 1987; Harris, Egan, Sonkkila, Tochon-Danguy, Paxinos, & Watson, 2000) als auch in Studien, die elektrophysiologische Verfahren benutzen (z.B. Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989), gefunden. Darüber hinaus zeigen bestimmte EEG-Verlaufscharakteristika bei der Stimulusidentifikation und -klassifikation eine stark ausgeprägte positive Komponente, die P300, über den parietalen Elektroden. Die Amplitude der P300 zeigt sich hierbei invers bezogen auf die Stimulusausrichtung.

So beobachteten Wijers et al. (1989), die ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs) während mentaler Rotation gemessen haben, eine deutliche Negativierung an den parietalen Elektroden, die mit steigendem Rotationswinkel zunahm. Sie vermuteten, dass diese Abnahme der Positivierung durch eine langsame Negativierung, die zeitgleich mit der P300 auftritt und diese überlagert, hervorgerufen wird. Darüber hinaus sahen sie die Negativierung als das direkte elektrophysiologische Korrelat der mentalen Rotation an (siehe auch Heil, 2002). Heil, Bajric, Rösler und Hennighausen (1996) konnten nachweisen, dass die erwähnte Amplitudenmodulation nur dann auftritt, wenn zur Lösung der Aufgabe der Prozess der mentalen Rotation notwendig ist. Im Gegensatz zu einer Klassifikationsaufgabe, bei der die Amplitude der P300 nicht durch die Orientierung des Stimulus beeinträchtigt wurde, zeigten sie während einer mentalen Rotationsaufgabe einen Zusammenhang von Amplitude und Rotationswinkel. Die Positivierung war in der aufrechten Position des Stimulus am größten und wurde mit zunehmendem Rotationswinkel geringer. Je nach Rotationswinkel eines Reizes ändert sich allerdings auch der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe. Dass dieser jedoch keinen Einfluss auf die Amplitudenmodulation hat, konnten Bajric, Rösler, Heil und Hennighausen (1999) zeigen. Darüber hinaus wurden Belege dafür gefunden, dass der Beginn der rotationsabhängigen Negativierung den Beginn des kognitiven Prozesses der mentalen Rotation darstellt (Heil & Rolke, 2002).

1.2.2 Lateralisierung

In Bezug auf die Lateralisierung wird allgemein angenommen, dass es sich bei der mentalen Rotation um einen Prozess handelt, der grundsätzlich in der rechten Hemisphäre lokalisiert ist (für einen Überblick, siehe Corballis, 1997). Eine Reihe von Forschungsergebnissen zeigen jedoch ein heterogenes Bild. So ergaben beispielsweise einige Läsionsstudien Beeinträchtigungen in der mentalen Rotationsleistung nach Läsionen der rechten Hemisphäre (Ratcliff, 1979; Farah & Hammond, 1988; Ditunno & Mann, 1990), andere fanden Leistungseinbußen nach linkshemisphärischen Läsionen (Metha & Newcombe, 1991). Auch wurde gezeigt, dass gesunde Probanden eine Aufgabe zur

mentalen Rotation schneller und mit weniger Fehlern lösten, wenn die Stimuli dem linken Gesichtsfeld präsentiert, und damit rechtshemisphärisch verarbeitet wurden (Ditunno & Mann, 1990; aber siehe auch: Fischer & Pellegrino, 1988; Corballis & McLaren, 1984; Van Strien & Bouma, 1990).

Weitere Evidenz für eine lateralisierte Verarbeitung erbrachten Untersuchungen, die den cerebralen Blutfluss von Probanden während des Lösen von verschiedenen visuell-räumlichen Aufgaben gemessen haben. Bei Aufgaben zur mentalen Rotation zeigte sich eine stärkere Durchblutung der rechten Hemisphäre (Deutsch, Bourbon, Papanicolaou, & Eisenberg, 1988; Harris et al., 2000). Andere Untersuchungen ergaben hingegen, dass es sich bei der mentalen Rotation um keinen hemisphärenspezifischen Prozess handelt (Milivojevic, Hamm, & Corballis, 2008). Unterstützende Ergebnisse erbrachten Studien, die ereigniskorrelierte Potenziale maßen und keine Lateralisierung fanden (Peronnet und Farah, 1989; Beste, Heil, & Konrad, 2009). Andere berichten jedoch von einer Linkslateralisierung (Corballis & Sergent, 1989; Alivisatos & Petrides, 1997).

Wie ausgeführt zeigt sich die Datenlage hinsichtlich der Bestimmung der Hemisphäre, in der mentale Rotation stattfindet, uneinheitlich. Dafür verantwortlich sind eine Reihe von Faktoren, die zum einen die Lateralisierung beeinflussen und zum anderen miteinander interagieren, wie beispielsweise das Geschlecht (Roberts & Bell, 2000), die Händigkeit (Johnson, McKenzie, & Hamm, 2002), die räumliche Intelligenz (Rösler, Heil, Pauls, Bajric & Hennighausen, 1994), der Geschlechtshormonspiegel (McCormick & Teillon, 2001), die Dimensionalität der geforderten Rotation (Roberts & Bell, 2003), die Schwierigkeit der Aufgabe (Corballis & McLaren, 1984), das Stimulusmaterial (Desrocher, Smith, & Taylor, 1995) und die verwendete Strategie (Corballis, 1997).

1.2.3 Kortikale Implementierung und Lateralisierung bei Kindern

Trotz der verhältnismäßig geringen Anzahl von Untersuchungen konnte belegt werden, dass das Muster der Hirnaktivierung bei Kindern während der mentalen Rotation mit der der Erwachsenen vergleichbar ist (Booth, MacWhinney, Thulborn, Sacco,

Voyvodic, & Feldmann, 1999), die interindividuelle Variabilität im EEG hingegen bei ihnen wesentlich größer ist als bei Erwachsenen (Roberts & Bell, 2002).

Mit der Entwicklung der Hemisphärenasymmetrie bei mentaler Rotation beschäftigten sich Jansen-Osmann und Heil (2007a). Sie konnten zeigen, dass die bei Erwachsenen bekannte Amplitudenmodulation während mentaler Rotation auch bei 7-8jährigen Kindern und 11-12jährigen Jugendlichen zu beobachten ist. Während einer mentalen Rotationsaufgabe mit Buchstaben beobachteten sie eine deutliche linkshemisphärische Aktivierung bei den Kindern, einen nicht signifikanten Trend in diese Richtung bei den Jugendlichen und eine klare bilaterale Aktivität bei den Erwachsenen. Sie schlossen deshalb auf einen entwicklungsbedingten Wechsel der Hemisphärenlateralisierung von links nach bilateral. In einer Folgestudie konnten diese Ergebnisse repliziert werden (Heil & Jansen-Osmann, 2007). Gleichzeitig wurde gezeigt, dass die zuvor beobachtete linkshemisphärische Aktivität bei Kindern, solange Buchstaben als Stimulusmaterial benutzt werden, nicht auf unspezifische Schwierigkeitseffekte zurückzuführen ist, sondern spezifisch für diesen Aufgabentyp ist. Mit Tierzeichnungen als Stimulusmaterial konnte hingegen keine Lateralisierung beobachtet werden (Lange, Heil, & Jansen, 2010).

Da Geschlechtsunterschiede bei der mentalen Rotation von Vorschulkindern im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen, werden im Folgenden die Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede ausführlich dargestellt.

1.3 Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede

Bei der mentalen Rotation handelt es sich um die Kategorie der räumlich kognitiven Fähigkeiten, bei der die größten Vorteile für Männer im Vergleich zu Frauen zu beobachten sind (Linn & Petersen, 1985; Voyer, Voyer, & Bryden, 1995). Der Grad des Einflusses des Geschlechts auf die Rotationsleistung hängt jedoch mit der in der jeweiligen Studie angewandten Methode zusammen. Während sich in psychometrischen Tests meist deutliche Vorteile zugunsten der Männer finden lassen (siehe Linn & Petersen, 1985), zeigt sich die Befundlage in chronometrischen Studien heterogen. In einigen Studien wurden Geschlechtsunterschiede nachgewiesen (Monahan, Harke, & Shelley, 2008;

Parsons et al., 2004), in anderen nicht (Desrocher et al., 1995; Jordan, Wuestenberg, Heinze, Peters, & Jäncke, 2002). Auch die Befunde zu Geschlechtsunterschieden bei Kindern sind widersprüchlich. Während in einer Reihe von Studien keine Geschlechtsunterschiede vor dem 10. Lebensjahr gefunden wurden (z.B. Alyman & Peters, 1993; Johnson & Meade, 1987) konnte, eine hinreichende Teststärke vorausgesetzt, die überlegene Leistung des männlichen gegenüber dem weiblichen Geschlecht bereits bei Grundschulern (Heil & Jansen-Osmann, 2008a), Kindergartenkindern (Casey et al., 2008; Levine et al., 1999) und sogar in den ersten drei bis fünf Lebensmonaten gezeigt werden (Moore & Johnson, 2008; Quinn & Liben, 2008).

Auch wenn geschlechtsspezifische Unterschiede bei bestimmten intellektuellen Fähigkeiten, speziell auch bei der Mentalen Rotation, konsistent gefunden werden, ist die Frage der Ursache hierfür nicht eindeutig geklärt. Sowohl biologische als auch soziale Faktoren werden diskutiert, wobei sich herausgestellt hat, dass beide Einflüsse relevant sind und darüber hinaus auch miteinander interagieren. Aus diesem Grund werden kognitive Geschlechtsunterschiede zunehmend unter einem psychobiosozialen Ansatz untersucht (z.B. Hausmann, Schoofs, Rosenthal, & Jordan, 2009). Darüber hinaus können auch die Anwendung unterschiedlicher Strategien und Stimuluseigenschaften einen Einfluss auf Geschlechtsunterschiede haben (Jansen-Osmann & Heil, 2007c).

1.3.1 Biologisch-neuronale Faktoren

Als Erklärung im Rahmen des biologischen Ansatzes werden Unterschiede zwischen Männern und Frauen in Bezug auf Denken und Handeln vornehmlich auf geschlechtsabhängige Differenzen in der anatomischen und funktionellen Organisation des Gehirns zurückgeführt. Neben Unterschieden im Neokortex und in kortikalen Subregionen spielt die Hemisphärenasymmetrie (Lateralisierung), d.h. die ungleiche Verteilung einzelner Funktionen auf die beiden Gehirnhälften, eine zentrale Rolle. Sie kann als ein fundamentales Organisationsprinzip des menschlichen Gehirns angesehen werden. Seit mehr als einem Jahrhundert wissen Forscher, dass die beiden Hemisphären unterschiedliche Aufgaben erfüllen (Geschwind & Galaburda, 1987). Die linke Hemi-

sphäre ist in erster Linie für sprachgebundene Leistungen verantwortlich, die rechte Hemisphäre hingegen eher für nonverbale Leistungen wie anschauliches Vorstellen und räumliche Fähigkeiten (Hugdahl & Davidson, 2002; Hausmann & Bayer, 2009).

Eine auf das Geschlecht bezogene unterschiedliche Lateralisierung hinsichtlich der Hirnaktivität beim Lösen von Aufgaben zur Mentalen Rotation wurde in den letzten Jahren immer wieder gefunden (Hugdahl et al., 2006; Seurinck, Vingerhoets, de Lange, & Achten, 2004; Jordan et al., 2002). Obwohl auch widersprüchliche Befunde hierzu existieren (z.B. Ashton & McFarland, 1991), weist die Mehrzahl der experimentellen Daten darauf hin, dass die Lateralisierung für verbale und visuell-räumliche Prozesse bei Männern stärker als bei Frauen ausgeprägt ist, während bei Frauen kaum Links- Rechts-Unterschiede auftreten (z.B. Howard, Fenwick, Brown, & Norton, 1992; Kimura, 1992, McGlone, 1980). Frauen scheinen die linke Hemisphäre nicht nur für die Bearbeitung verbaler Aufgaben zu nutzen, sondern auch um nichtverbale Aufgaben zu lösen. Männer hingegen zeigen eine klare rechtshemisphärische Aktivierung bei räumlichen Aufgaben (Howard et al., 1992). Unterstützende Evidenz für diese Befunde ergibt sich aus Läsionsstudien. So verglich McGlone (1978) beispielsweise die Testergebnisse des Wechsler-Intelligenztests (1955) von 40 Männern und 37 Frauen mit entweder links- oder rechtshemisphärischen Läsionen nach einem Schlaganfall oder einem Hirntumor. Im Ergebnis zeigten nur die Männer der Stichprobe spezifische verbale Defizite nach linkshemisphärischen Läsionen und nichtverbale Defizite nach rechtshemisphärischen Läsionen. Bei den Frauen hingegen zeigten sich die kognitiven Defizite insgesamt weniger stark ausgeprägt und auch weniger spezifisch. McGlone schloss daraus, dass das erwachsene männliche Gehirn, sowohl für verbale als auch für nichtverbale Fähigkeiten, asymmetrischer organisiert ist als das weibliche Gehirn. In den Neurowissenschaften geht man davon aus, dass die Lateralisierung neben den Unterschieden auf der strukturellen Ebene, die wahrscheinlich in der frühen Ontogenese festgelegt werden, auch aus asymmetrischen Interaktionen zwischen den Hemisphären resultiert. Diese können über kurze Zeiträume hinweg variieren, d.h. durch die momentane Konzentration von Sexu-

alhormonen verändert werden (Güntürkün & Hausmann, 2003). Dieser Mechanismus von Hormonen wird auch aktivierend genannt.

Aktivierende Effekte entstehen folglich bei gesunden Menschen durch natürliche Schwankungen im Sexualhormonspiegel, die wiederum bestimmte kognitive Prozesse beeinflussen. Dieser Zusammenhang kann am anschaulichsten mit weiblichen Versuchspersonen untersucht werden, da der Hormonspiegel bei Männern recht konstant bleibt, bei Frauen hingegen im Verlauf des Menstruationszyklus starke Veränderungen auftreten. Hausmann, Slabbekoorn, van Goozen, Cohen-Kettenis und Güntürkün (2000) ließen Probandinnen während der Menstruation und während der mittlutealen Phase räumliche Tests bearbeiten. Sie beobachteten beim 3D- mentalen Rotationstest deutlich bessere Leistungen während der Menstruation im Vergleich zur mittlutealen Phase. Die Leistungsschwankungen erklärten sie durch die verschiedenen hohen Konzentrationen von Östradiol und Testosteron. Je höher der Testosteronspiegel in Verbindung mit einem niedrigen Östradiolspiegel war, desto besser war die Leistung im 3D- mentalen Rotationstest. Weitere Studien zeigten zudem, dass die starken Hormonschwankungen innerhalb des Menstruationszyklus auch zu Veränderungen in Bezug auf die Lateralisierung führen (Hausmann, 2005; Schöning et al., 2007). Ein Zusammenhang zwischen dem Sexualhormonspiegel und kognitiven Fähigkeiten wurde jedoch nicht immer gefunden (Epting & Overman, 1998; Liben et al., 2002; Rosenberg & Park, 2002).

Organisierende Effekte beziehen sich auf pränatale, hormonelle Einflüsse. Das Geschlecht eines Embryos wird zwar durch die Chromosomen festgelegt, bis zur siebten Woche entstehen jedoch bei beiden Geschlechtern die gleichen Genitalanlagen. Durch hormonelle Faktoren werden dann die Organanlagen des einen Geschlechts gebildet und die des anderen unterdrückt. Während zur Ausprägung des weiblichen Geschlechts zu diesem Zeitpunkt keine Hormonzufuhr notwendig ist, sind Androgene erforderlich, um die männliche Entwicklung zu steuern und die weibliche zu unterdrücken.

Sexualhormone steuern während der frühen Entwicklung anscheinend nicht nur die Verschiedenartigkeit des Gehirns, sondern auch Unterschiede im Verhalten zwischen den Geschlechtern (Kimura, 1992). Ein hohes Androgenniveau soll in diesem Zusammenhang räumliche Fähigkeiten erhöhen und beispielsweise die Wortflüssigkeit senken. Ergebnisse der tierexperimentellen Forschung bestätigen diese Annahmen. So konnte gezeigt werden, dass sowohl das Verhalten (Merz, 1979) als auch das räumliche Denken (Williams & Meck, 1991) zum Teil durch die hormonelle Umwelt vor der Geburt determiniert wird. In Bezug auf den Menschen existieren Befunde von Populationen, die aufgrund von Erkrankungen sehr niedrige oder sehr hohe Konzentrationen von Sexualhormonen im Blut aufweisen, so z.B. von Patienten mit androgenitalem Syndrom (AGS; Hines, Brook, & Conway 2004). Bei diesen produzieren die Nebennieren zuviel Androgen. Dies führt bei Mädchen zum einen zu einer Vermännlichung des Genitals und zum anderen zu einer Steigerung der Fähigkeiten, insbesondere bei den räumlichen Tests, bei denen in der Regel Männer bessere Ergebnisse erzielen als Frauen. (Resnick, Berenbaum, Gottesman, & Bouchard, 1986; Hampson, Rovet, & Altmann, 1998; siehe aber auch Hines, Fane, Pasterski, Mathews, Conway, & Brook, 2003). Diese Fähigkeiten sind jedoch nicht durch stetig weiter steigende Androgenkonzentrationen weiter verbesserbar. Hampson et al. (1998) fanden in ihrer Untersuchung mit AGS-Jungen, die einer erhöhten Androgenkonzentration ausgesetzt waren, eine verminderte räumliche Leistung im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe. Die räumlichen Fähigkeiten scheinen somit bei Menschen, die früh mittleren Konzentrationen männlicher Geschlechtshormone ausgesetzt waren, am besten ausgeprägt zu sein.

1.3.2 Psycho-soziale Faktoren

Zu den sozialen Faktoren, die Beachtung finden, gehören verschiedene Einflüsse durch die Umgebung, die Verwendung unterschiedlicher kognitiver Strategien und unterschiedlichen Stimulusmaterials.

In Bezug auf den Umgebungsfaktor wird u.a. vermutet, dass die unterschiedliche Leistung von Frauen und Männern in räumlichen Tests durch umweltbedingte Vorer-

fahrungen beeinflusst wird (z.B. Baenninger & Newcombe, 1989; Ginn & Pickens, 2005). Die Erklärungen beruhen darauf, dass sich Jungen beispielsweise eher mit „räumlichem“ Spielzeug wie Bauklötzen oder Videospielen beschäftigen und häufiger in unbekannten Umgebungen unterwegs sind, weil sie öfter alleine draußen herumlaufen dürfen als Mädchen. Studien aus der Aktionsraumforschung belegen zudem geringere Geschlechtsunterschiede in Kulturen, in denen sich die Alltagsaktivitäten zwischen Männern und Frauen kaum unterscheiden (Berry, 1966). Auch werden „Performanzfaktoren“ für die Differenzen zwischen den Geschlechtern mitverantwortlich gemacht, denn die Geschlechtsunterschiede können in Abhängigkeit von Zeitbegrenzung (Goldstein, Haldane, & Mitchell, 1990), der Instruktion (Brosnan, 1998) und der Bekanntheit bzw. der Alltagsrelevanz des Reizmaterials (Alyman & Peters, 1993) variieren. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Interpretation der jeweiligen Testsituation Einfluss auf die Leistung bei einem kognitiven Test hat. Versuchspersonen strengen sich stärker an eine bestimmte kognitive Aufgabe zu lösen, wenn sie davon überzeugt sind, dass mit dieser Aufgabe Funktionen getestet werden, die konsistent mit der eigenen Geschlechterrolle sind (Massa, Mayer, & Bohon, 2005).

1.3.2.1 Einfluss von Strategien

Über die bereits genannten Einflussfaktoren hinaus ist seit langem bekannt, dass Aufgaben zum räumlichen Vorstellungsvermögen, speziell zur Mentalen Rotation, mit Hilfe unterschiedlicher Strategien gelöst werden können. In diesem Zusammenhang werden zwei Theorien diskutiert, die Theorie der holistischen und die Theorie der analytischen Verarbeitung. Die Theorie der holistischen Verarbeitung beschreibt eine ganzheitliche Betrachtung und Verarbeitung eines Stimulus, die Reaktionszeit ist einzig abhängig von dem Drehwinkel des Objektes (Cooper & Shepard, 1982). In der Theorie der analytischen Verarbeitung hingegen werden die Objekte vor der Rotation in Einzelsegmente unterteilt, welche dann jeweils einzeln rotiert werden (Pylyshyn, 1979). Oftmals werden diese Strategieunterschiede als Erklärung für Geschlechtsunterschiede herangezogen, insgesamt zeigen sich jedoch immer wieder sowohl inter- als auch

intraindividuelle Differenzen. So scheint beispielsweise mit steigender Aufgabenkomplexität häufig ein Wechsel von einer holistischen zu einer analytischen Strategie stattzufinden (Yuille & Steiger, 1982) und auch die individuellen Fähigkeiten der Versuchspersonen scheinen eine gewichtige Rolle zu spielen (Corballis, 1997; Just & Carpenter, 1985; Glück & Fitting, 2003). Dies legt den Schluss nahe, dass Personen mit einer besseren Raumvorstellungsfähigkeit auch noch bei schwierigen Aufgaben holistisch vorgehen können, Personen mit schwächeren räumlichen Fähigkeiten hingegen schon eher zu analytischen Strategien wechseln müssen.

In Bezug auf die Hemisphärenasymmetrie sieht Corballis (1997) einen Zusammenhang zwischen der Lateralisierung und der angewendeten Verarbeitungsstrategie. Seiner Meinung nach führt das Anwenden einer holistischen Strategie, d.h. das Rotieren eines Objekts als Ganzes, zu einer Rechtslateralisierung. Das Anwenden einer analytischen Strategie, d.h. das Rotieren „Stück für Stück“, soll hingegen zu einer Linkslateralisierung führen. Einige Autoren gehen davon aus, dass sich Frauen und Männer unterschiedlicher Strategien bedienen, um Aufgaben zur mentalen Rotation zu lösen. Sie nehmen an, dass Männer im Gegensatz zu Frauen ein Objekt komplett rotieren (Cochran & Wheatley, 1989), was wiederum zu einer Rechtslateralisierung führt (z.B. Hugdahl et al., 2006). Heil und Jansen-Osmann (2008) zeigten in ihrer Studie mit Erwachsenen, in der sie Polygone unterschiedlicher Komplexität als Stimulusmaterial nutzten, insgesamt schnellere Reaktionsgeschwindigkeiten der Männer im Gegensatz zu den Frauen, die sich zudem unabhängig von der Komplexität des Stimulusmaterials zeigten. Bei den Frauen hingegen stiegen die Reaktionszeiten mit zunehmender Komplexität des Stimulusmaterials an. Die Autoren schlussfolgerten daraus eine analytische Verarbeitungsstrategie der Frauen und eine holistische der Männer (andererseits siehe auch: Bryden, George, & Inch, 1990).

1.3.2.2 Einfluss von Stimulusmaterial

Nachdem Shepard und Metzler (1971) in ihrer klassischen Studie zur mentalen Rotation dreidimensionale Würfelfiguren (siehe Abbildung 1) als Reize benutzt haben,

kam es in der Folge zu einer Reihe von Untersuchungen mit unterschiedlichem zweidimensionalem Stimulusmaterial. Als Reize wurden u.a. alphanumerische Zeichen (z.B. Corballis, 1986; Jordan et al., 2002), Polygone (z.B. Cooper, 1975), PMA-Figuren (z.B. Kail et al., 1980) und Tierzeichnungen (z.B. Jansen-Osmann & Heil, 2007) benutzt. Einige Autoren sehen in diesem Zusammenhang eine Sonderstellung bei der Verarbeitung von Buchstaben, da diese eine Kategorie von Stimuli bilden, mit denen Menschen große Erfahrung haben (z.B. Burgund, Schlaggar, & Petersen, 2006). So zeigten Studien mit Erwachsenen, die die Mentale Rotation von überlernten Symbolen, d.h. Buchstaben und Zahlen im Vergleich mit abstrakten Symbolen untersucht haben, dass Erstere schneller rotiert werden können (Cohen & Polich, 1989; Jordan et al., 2002; Kail et al., 1980). Der Unterschied, so wird vermutet, liegt in der Vertrautheit mit dem Material. So zeigten Koriat und Norman (1985), dass für Buchstaben in ungewohnter Ausrichtung mehr Zeit für die Rotation benötigt wird, als für solche in gewohnter Ausrichtung. Darüber hinaus konnte in entwicklungspsychologischen Studien zur Verarbeitung von Buchstaben bereits bei Sechsjährigen eine bessere Leistung bei Aufgaben mit Buchstaben im Vergleich zu Aufgaben mit Symbolen beobachtet werden (Miller & Wood, 1995; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro, & Eden, 2003).

Die Wahl des Stimulusmaterials hat aber nicht nur Einfluss auf die Leistung, sondern auch auf den Geschlechtsunterschied. Die Mentale Rotation von Buchstaben bildet beispielsweise eine Kategorie, in der Frauen immer wieder genauso gut abschneiden wie Männer (Campos & Cofan, 1986). Linn und Petersen (1985) vermuteten in diesem Zusammenhang, dass die Überlegenheit der Frauen mit Buchstaben umgehen zu können die Überlegenheit der Männer in Bezug auf die mentale Rotation ausgleicht. Eine weitere Vermutung bezieht sich darauf, dass Männer und Frauen gleichermaßen Erfahrung mit Buchstaben haben und deshalb gleich geschickt im Umgang mit ihnen sein müssten (Koriat & Norman, 1985). Andererseits verglichen Jansen-Osmann und Heil (2007) bei einer Aufgabe zur mentalen Rotation fünf verschiedene Arten von Stimuli (Buchstaben, PMA-Figuren, Tierzeichnungen, Polygone und 3D-Würfelfiguren) und fanden einzig bei der Bearbeitung von Polygonen Geschlechtsunterschiede in Bezug auf

die Rotationsgeschwindigkeit. Daher sahen sie insgesamt eine Übergeneralisierung in der Aussage Männer überträfen Frauen in Bezug auf die Geschwindigkeit bei der Mentalen Rotation.

1.4 Zentrale Fragestellungen

Aufgaben zur mentalen Rotation gehören zu der Kategorie der räumlich kognitiven Aufgaben, bei der das männliche Geschlecht typischerweise bessere Leistungen zeigt als das weibliche Geschlecht. Sogar bei Vorschulkindern konnten diese Vorteile zugunsten der Jungen beobachtet werden (Levine et al., 1999). Während Untersuchungen mit Erwachsenen immer wieder aufzeigen konnten, dass diese Leistungsunterschiede von Unterschieden in der Lateralisierung begleitet werden, existierten bis heute keinerlei derartige Befunde zu Kindern im Kindergartenalter.

In Bezug auf unsere erste Studie erwarteten wir folglich auf der Verhaltensebene eine bessere Leistung der Jungen beim Lösen der räumlichen Aufgabe, die sich in besseren Reaktionszeiten und/oder einer geringeren Fehlerzahl niederschlagen sollte. Bis zum Zeitpunkt der Durchführung der ersten Studie war unklar ob es bei der mentalen Rotationsleistung in dem Alter zu Unterschieden kommt, die auf neuronaler Ebene nachzuweisen sind. Dies sollte im Rahmen dieser Studie überprüft werden.

Die zweite Studie diente zum einen dazu die gefundenen Ergebnisse hinsichtlich der Lateralisierungsunterschiede zu replizieren und zum anderen der Überprüfung der Leistungsunterschiede mit für diese Altersklasse schwierigerem Stimulusmaterial.

2 Experimente

Nachfolgend werden in zwei Studien auftretende Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung bei der mentalen Rotation von Kindern im Kindergartenalter beschrieben. In beiden Experimenten wurde das EEG über neun Elektroden abgeleitet (F3, FZ, F4, C3, CZ, C4, P3, PZ, P4; nach Jasper, 1958).

2.1 Mentale Rotation von Tierzeichnungen: Geschlecht und Lateralisierung

Aufgaben zur Mentalen Rotation zeigen bei Erwachsenen typischerweise einen Geschlechtseffekt zugunsten von Männern, der auch durch Unterschiede in der cerebralen Asymmetrie begleitet wird. Als Erklärung für diese Hirnasymmetrien werden hormonelle Einflüsse in Betracht gezogen, da sich die cerebrale Asymmetrie bei Frauen im Verlauf des Menstruationszyklusses verändert (z.B. Hausmann & Bayer, 2009). Bei Kindern konnten zwar in der Vergangenheit ebenfalls Geschlechtsunterschiede in den Verhaltensdaten schon vor dem fünften Lebensjahr beobachtet werden, ob diese jedoch ebenso wie bei den Erwachsenen durch Unterschiede in der Lateralisierung begleitet werden, wurde in diesem Experiment überprüft.

104 Vorschulkinder (49 Mädchen, 55 Jungen) im Alter zwischen vier und sechs Jahren nahmen im Rahmen von Einzeltestungen an der EEG- Untersuchung zur Mentalen Rotation mit Tierzeichnungen (aus Rossion & Purtois, 2004) teil. In vier Blöcken wurden insgesamt 240 „trials“ präsentiert. Der erste und der vierte Block bestanden aus jeweils 48 aufrechten Stimuli, der zweite und der dritte Block aus jeweils 72 rotierten Reizen. Bei jedem „trial“ wurden zwei Zeichnungen desselben Tieres präsentiert, wobei das linke Tier stets in seiner aufrechten Position abgebildet war und entweder nach rechts oder links schaute. Das rechte Tier war entweder identisch oder gespiegelt abgebildet. Während im ersten und vierten Block das rechte Tier ebenfalls aufrecht dargestellt war, war es im zweiten und dritten Block entweder um 90°, 180° oder 270° gedreht abgebildet, und die Kinder mussten Mentale Rotation anwenden, um zu entscheiden, ob die Tiere identisch oder gespiegelt waren (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Diese Abbildung zeigt ein Beispiel für einen in der mentalen Rotationsaufgabe benutzten Stimulus. Links ist ein identischer Trial in 180° Ausrichtung abgebildet, rechts ein spiegelverkehrter Trial in 180° Ausrichtung.

Als abhängige Variablen wurden die Fehlerrate, die Reaktionszeit und die gemittelte Amplitude zwischen 500 und 800 ms nach Erscheinen der Reize betrachtet.

Während sich Mädchen und Jungen in Bezug auf die Reaktionszeiten nicht unterschieden, zeigten die Jungen hinsichtlich der Fehlerrate eine bessere Leistung, wenn mentale Rotation erforderlich war (siehe Abbildung 3a). Wie bei Untersuchungen mit Erwachsenen regelmäßig beobachtet werden kann, zeigte sich auch bei den Vorschulkindern in Bezug auf die ERP-Effekte der vornehmlich parietale Amplitudeneffekt als Funktion der mentalen Rotation (siehe Abbildung 3b). Darüber hinaus zeigten sich Unterschiede in der Lateralisierung zwischen den Geschlechtern. Während der mentalen Rotation konnte bei den Jungen an den parietalen Elektroden eine bilaterale Hirnaktivität beobachtet werden, die Mädchen zeigten hingegen eine klare linkshemisphärische Aktivität (siehe Abbildung 3c). Es konnte folglich gezeigt werden, dass Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung während der mentalen Rotation nicht erst durch hormonelle Veränderungen in der Pubertät bedingt werden.

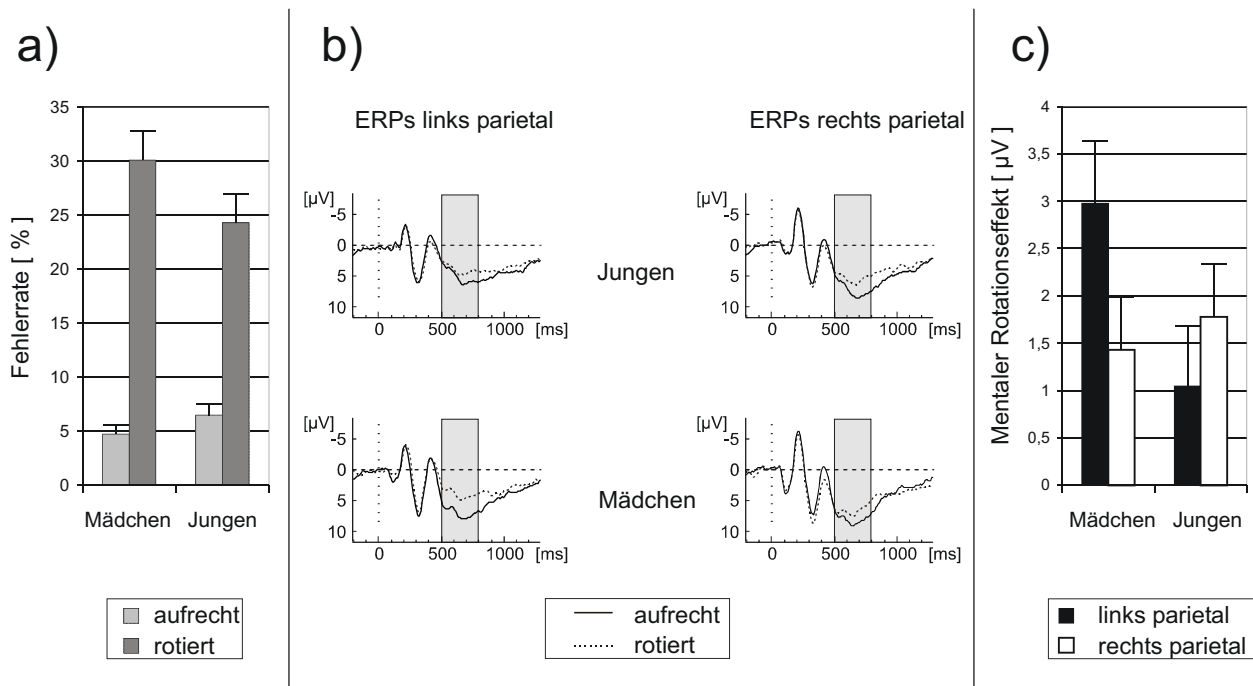


Abbildung 3a: Fehlerraten als Funktion von Geschlecht und der Ausrichtung der Reize.

Abbildung 3b: ERPs an der linken (P3) und rechten (P4) Elektrode als Funktion der Ausrichtung der Reize, jeweils für Jungen und Mädchen getrennt dargestellt.

Abbildung 3c: Mentaler Rotationseffekt (Differenz der Amplitude von aufrechten und rotierten Trials) als eine Funktion von Geschlecht und Hemisphäre.

2.2 Mentale Rotation von Buchstaben: Geschlecht und Lateralisierung

Die zweite Studie zur mentalen Rotation bei Vorschulkindern wurde durchgeführt, um einerseits die gefundenen Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung zu replizieren, und andererseits um zu überprüfen, ob sich diese auch mit Buchstaben, und somit für diese Altersgruppe schwierigerem Stimulusmaterial, finden lassen.

An dieser Studie nahmen 88 Kinder (47 Mädchen, 41 Jungen) im Alter zwischen vier und sechs Jahren teil. Wie in der ersten Studie wurden Blöcke mit aufrechten und mit rotierten Reizen präsentiert und die Kinder mussten entscheiden ob die beiden präsentierten Stimuli identisch oder gespiegelt waren. Als Stimulusmaterial wurden die Buchstaben F, P und R benutzt, von denen jeweils zwei gleiche Stimuli zusammen angeboten wurden. Der linke Buchstabe wurde immer aufrecht in seiner schriftsprachlich

bekannten Version präsentiert, der rechte Buchstabe entweder identisch oder gespiegelt und in den rotierten Blöcken zusätzlich um 150°, 180° oder 210° gedreht.

Als abhängige Variablen wurden die Fehlerfreiheit, die Reaktionszeit, sowie die gemittelte Amplitude zwischen 600 und 800 ms nach Erscheinen der Reize betrachtet.

Hinsichtlich der Verhaltensdaten unterschieden sich Mädchen und Jungen weder in Bezug auf die Fehler noch in Bezug auf die Reaktionszeit. Eine Amplitudenmodulation als Funktion der mentalen Rotation konnte, wie auch schon im vorangegangenen Experiment, nachgewiesen werden (Abbildungen siehe Arbeit 2). Des Weiteren zeigte sich ein Unterschied in der Lateralisierung zwischen den Geschlechtern. Während der mentalen Rotation konnten in Bezug auf die rechte Hemisphäre keine Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen beobachtet werden, es zeigte sich jedoch ein deutlicher Unterschied in der Aktivierung der linken Hemisphäre (siehe Abbildung 4). Somit konnten auch in dieser Hinsicht die Ergebnisse des ersten Experiments repliziert werden.

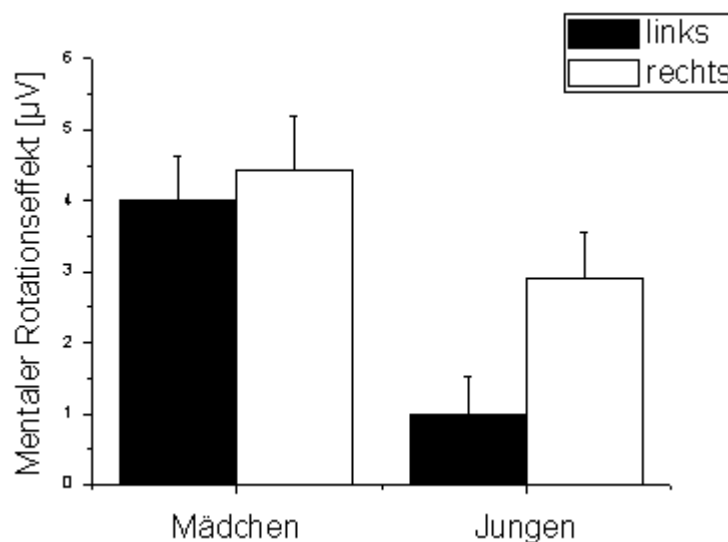


Abbildung 4: Mentaler Rotationseffekt (Differenz der Amplitude von aufrechten und rotierten Trials) als eine Funktion von Geschlecht und Hemisphäre.

3 Allgemeine Diskussion

In den für diese Arbeit durchgeführten Studien konnten die von Untersuchungen mit Erwachsenen bekannten rotationsabhängigen Amplitudeneffekte während mentaler Rotation bereits im Vorschulalter nachgewiesen werden. Sie zeigten sich sowohl bei einfachen Reizen (Tierbilder), als auch bei dem für diese Altersgruppe schwierigerem Stimulusmaterial (Buchstaben). Darüber hinaus konnten Lateralisierungsunterschiede zwischen den Geschlechtern beobachtet werden.

Im ersten Teil der Arbeit konnten Geschlechtsunterschiede sowohl auf der Verhaltensebene als auch auf elektrophysiologischer Ebene bereits im Vorschulalter gezeigt werden. Während Geschlechtsunterschiede in Form einer männlichen Überlegenheit in der Leistung bereits zuvor sowohl bei Kindergartenkindern (Casey et al., 2008; Levine et al., 1999) als auch innerhalb der ersten drei bis fünf Lebensmonate (Moore & Johnson, 2008; Quinn & Liben, 2008) gezeigt werden konnten, ist diese Studie die erste, die Unterschiede in der Lateralisierung zwischen Jungen und Mädchen im Kindergartenalter beim Lösen einer mentalen Rotationsaufgabe beobachten konnte. Während bei den Jungen eine bilaterale Hirnaktivität während der mentalen Rotation von Tierbildern beobachtet werden konnte, zeigte sich bei den Mädchen eine deutliche linkshemisphärische Aktivität.

An dieser Stelle stellte sich zunächst die Frage, ob die beobachteten Lateralisierungsunterschiede ursächlich für die gefundenen Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation sind, oder ob sie ein Effekt dieser sind. Sollten sich Männer und Frauen bzw. Jungen und Mädchen beispielsweise unterschiedlicher Strategien beim Lösen einer mentalen Rotationsaufgabe bedienen, könnte es sich bei den verschiedenen Lateralisierungsmustern um einen Effekt der jeweils angewandten Strategie handeln. Wie bereits in Kapitel 1.3.2.1. beschrieben gibt es durch Reaktionszeitstudien mit Erwachsenen Belege für die Annahme, dass Männer dazu tendieren ein Objekt holistisch zu rotieren, während Frauen sich eher der analytischen Verarbeitung eines Stimulus bedienen. Die jeweils angewandte Verarbeitungsstrategie führt dabei nach Corballis (1997) zu einer unterschiedlichen Lateralisierung. Evidenz für den Gebrauch unter-

schiedlicher Strategien bereits im Vorschulalter ergab sich in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht, da sich Mädchen und Jungen nicht hinsichtlich der Reaktionszeiten unterschieden.

Somit deuten die Ergebnisse dieser und der anderen oben genannten Studien erstens auf eine Begründung der Geschlechtsunterschiede während mentaler Rotation durch Lateralisierungsunterschiede hin und zweitens auf eine eher biologische Ursache der gefundenen Geschlechtseffekte bei einer räumlichen Aufgabe. Die Gründe für die Geschlechtsunterschiede scheinen ihre Wurzeln sehr früh im Leben eines Menschen zu haben und lassen somit erfahrungsbedingte Ursachen zweitrangig erscheinen. Gleichzeitig können auch aktivierende Hormoneffekte in diesem Zusammenhang ausgeschlossen werden, denn die Verhaltens- und Lateralisierungsunterschiede sind in einem Alter zu beobachten, in dem noch keine mit der Pubertät in Zusammenhang stehenden Hormonveränderungen auftreten. Beobachtete, durch Hormonschwankungen während des Menstruationszyklus bedingte Effekte (Schöning et al., 2007; Hausmann, 2005), scheinen somit Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung zu modulieren, die schon lange vor der Pubertät existieren.

Ob die Lateralisierungsunterschiede zwischen den Geschlechtern jedoch auf Geschlechtsunterschiede in der Hirnstruktur, sogenannte Sexualdimorphismen, zurückzuführen sind, und sofern dies zutrifft, ob sie genetisch oder hormonell bedingt sind, ist fraglich. Evidenz für die Existenz von hirnstrukturellen Geschlechtsdifferenzen ergibt sich aus einer Studie von Hänggi et al. (2008). Diese fanden, hauptsächlich in parietalen Regionen, einen Zusammenhang zwischen der Leistung bei visuell-räumlicher Kognition und weißer bzw. grauer Substanz. Während bei Frauen die visuell-räumliche Leistung vorwiegend mit dem Volumen der linkshemisphärischen grauen Substanz korrelierte, korrelierte sie bei Männern mit dem Volumen der rechtshemisphärischen weißen Substanz. Sowohl genetische als auch hormonelle Faktoren kommen als Ursache für diese Unterschiede in Betracht, da sie beide Auswirkungen auf neuronale Netzwerke haben, die auch für die räumliche Kognition wichtig sind. So weisen Personen mit dem Turner-Syndrom, einer genetischen Erkrankung bei Frauen, bei der die Betroffenen – in

allen oder in einem Teil der Zellen – nur ein X-Chromosom anstelle des sonst vorhandenen Geschlechtschromosomenpaares aufweisen, einerseits strukturelle Unterschiede in den Parietallappen im Vergleich zu gesunden Probanden auf, und andererseits auch kognitive Defizite in visuell-räumlichen Fähigkeiten (Brown et al., 2004; Molko et al., 2004). Es wurden jedoch auch hormonell bedingte hirnstrukturelle Unterschiede zwischen den Geschlechtern gefunden. So wiesen Goldstein et al. (2001) größere Sexualdimorphismen in Hirnregionen nach, die jenen entsprechen, welche in tierexperimentellen Studien während entscheidender Perioden der Hirnentwicklung eine im Vergleich zu anderen Regionen größere Anzahl von Hormonrezeptoren aufweisen. Auf der anderen Seite konnte auch nachgewiesen werden, dass durch eine Zunahme von grauer Substanz bedingte hirnstrukturelle Änderungen auch nach ausgiebigem Lernen oder Training auftreten (Draganski et al., 2004; 2006). Die Veränderung des Volumens der grauen Substanz ist hierbei auf einen Anstieg von Gewebe zurückzuführen, welches für die Informationsverarbeitung notwendig ist.

Campbell und Eaton (1999) kamen in ihrer Metaanalyse zu dem Ergebnis, dass Jungen bereits im Säuglingsalter ein höheres Aktivitätsniveau zeigen als Mädchen. In Folge dessen begegnen sie verschiedensten Umgebungen und dies stellt höhere Anforderungen an jene neuronalen Netzwerke, die für die räumliche Kognition wichtig sind. In diesem Zusammenhang konnten Studien zeigen, dass die räumlichen Fähigkeiten von Frauen sich verbessern, wenn sie sich vermehrt mit männlich assoziierten Aktivitäten beschäftigen und dass geschlechtsstereotype räumliche Aktivitäten, wie beispielsweise das Spielen von Videospielen, die visuell-räumliche Leistung einer Person vorher-sagen können (Ginn & Pickens, 2005; Signorella, Jamison, & Hansen Krupa, 1989). Im Gegensatz zu diesen Befunden zeigten jedoch Heil, Rösler, Link und Bajric (1998), dass Übung zur Leistungssteigerung führt und niedrigere Reaktionszeiten bei einer geforder-ten mentalen Operation einfach durch besser entwickelte Gedächtnisrepräsentationen entstehen.

Zusammenfassend hat diese erste Untersuchung gezeigt, dass geschlechtsbedingte Hemisphärenunterschiede während der Mentalen Rotation bereits im Vorschulalter nachweisbar sind.

Im zweiten Teil der Arbeit, in dem Buchstaben als Stimulusmaterial benutzt wurden, wurden im Gegensatz zur ersten Untersuchung keine Unterschiede auf der Verhaltensebene gefunden, die Geschlechtsunterschiede hinsichtlich der Lateralisierung konnten hingegen repliziert werden. Während in Bezug auf die rechtshemisphärische Aktivität kein Unterschied zwischen den Geschlechtern gefunden wurde, zeigte sich linkshemisphärisch ein deutlicher Unterschied während der mentalen Rotation. Die Mädchen zeigten insgesamt ein bilaterales, die Jungen ein rechtshemisphärisches Aktivierungsmuster. Diese Ergebnisse unterstützen somit die Annahme, dass Frauen die linke Hemisphäre sowohl beim Lösen verbaler als auch nicht-verbaler Aufgaben nutzen, während Männer eine spezialisiertere Lateralisierung in Bezug auf verbale und visuell-räumliche Aufgaben zu zeigen scheinen (Howard et al., 1992). Ein möglicher Erklärungsansatz hinsichtlich eines Gebrauchs unterschiedlicher Strategien kam, ebenso wie in der ersten Untersuchung nicht in Betracht, da sich auch in dieser Studie keine Geschlechtsunterschiede hinsichtlich der Reaktionszeiten gezeigt haben. Der Gebrauch einer analytischen im Gegensatz zu einer holistischen Strategie hätte sich jedoch in längeren Reaktionszeiten zeigen müssen. Die deutliche rechtshemisphärische Aktivität bei den Jungen spricht, wenn man die bisherigen Befunde zu Verarbeitungsstrategien zu Grunde legt, jedoch trotzdem für eine holistische Verarbeitungsweise, während das bilaterale Aktivitätsmuster bei den Mädchen vermuten lässt, dass diese eine Mischung aus beiden Strategien nutzen.

Buchstaben gehören zu den Stimuli, bei denen Männer und Frauen im Allgemeinen nicht die üblichen Geschlechtseffekte während der mentalen Rotation zeigen und zwar weder bezüglich der Leistung (Jansen-Osmann & Heil, 2007c) noch in Bezug auf die Hirnaktivität (z.B. Beste et al., 2009; Heil & Jansen-Osmann, 2007). Wie bereits in Kapitel 1.3.2.2 beschrieben vermuteten Linn und Petersen (1985) in diesem Zusammen-

hang, dass hier der Vorteil der Frauen mit Buchstaben umgehen zu können, den Vorteil der Männer bei der mentalen Rotation ausgleicht.

Ein wesentliches Ergebnis der zweiten Untersuchung dieser Arbeit besteht darin, dass erneut gezeigt werden konnte, dass Geschlechtsunterschiede in der Hirnaktivität, ungeachtet aktivierender Hormoneffekte, die in der Pubertät auftreten, schon in der Kindheit existieren. Ob diese Unterschiede jedoch eher auf vor- oder aber nachgeburtliche Hormoneinflüsse zurückzuführen sind ist bisher nicht erwiesen. Ein deutlicher Hinweis für einen Zusammenhang zwischen dem räumlichen Vorstellungsvermögen und vorgeburtlichem Hormoneinfluss ergibt sich aus Untersuchungen von Patienten, die aufgrund verschiedener Erkrankungen, vor oder kurz nach der Geburt einer ungewöhnlichen geschlechtshormonellen Umwelt ausgesetzt waren und somit entweder zu niedrige oder zu hohe Konzentrationen von Sexualhormonen aufwiesen. Die meisten dieser Studien haben kognitive Effekte bei Patienten mit dem androgenitalen Syndrom untersucht (siehe auch Kapitel 1.3.1). Die bei dieser Erkrankung übliche exzessive Überproduktion von Androgen führte bei betroffenen Mädchen zu einer Verbesserung der räumlichen Leistungen (Resnick et al., 1986; Hampson et al., 1998). Andererseits konnte eine jüngere Studie, speziell bei der mentalen Rotation, keine besseren Fähigkeiten feststellen, bei zielgerichtetem Werfen hingegen schon (Hines et al, 2003). Da bei betroffenen weiblichen Säuglingen in der Regel der erhöhte Hormonspiegel bereits kurz nach der Geburt korrigiert wird, vermuteten die Autoren, dass die organisierenden Hormoneffekte verschiedene kognitive Funktionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten beeinflussen. So spekulierten sie beispielsweise, dass die erhöhte Androgenproduktion das zielgerichtete Werfen vorgeburtlich, die mentale Rotation hingegen erst nach der Geburt beeinflussen könnte. Diese Studie wies jedoch einige methodische Mängel auf (fehlende Kontrolle der nachgeburtlichen Hormonkorrektur und aktivierender Hormoneffekte). Eine aktuelle Untersuchung mit 200 zweieiigen Zwillingsfrauen erbrachte weitere Evidenz für die Annahme organisierender vorgeburtlicher Hormoneffekte. In einer psychometrischen Aufgabe zur mentalen Rotation zeigten Frauen mit einem männlichen Zwilling bessere Leistungen als Frauen mit einem weiblichen Zwilling. In einer

Kontrollgruppe war die Leistung der Frauen mit einem etwas älteren Geschwisterkind hingegen nicht abhängig vom Geschlecht des Geschwisterkindes. Die Autoren sehen in diesen Ergebnissen einen Beleg für den Einfluss pränatalem Testosterons auf die mentale Rotationsleistung (Heil, Kavšek, Rolke, Beste, & Jansen, 2010).

Zusammenfassend unterstützen diese Ergebnisse die Befunde der ersten Studie. Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung während Mentaler Rotation sind mit unterschiedlichem Stimulusmaterial bereits ab dem Vorschulalter beobachtbar. Folglich erfordern Geschlechtsunterschiede in Bezug auf die Hirnaktivität keine hormonellen Veränderungen, die mit der Pubertät auftreten.

3.1 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten sowohl die von Untersuchungen mit Erwachsenen und Schulkindern bekannten Amplitudeneffekte während mentaler Rotation (z.B. Bajric et al., 1999; Heil & Jansen-Osmann, 2007) bereits bei Fünf- bis Sechsjährigen aufgezeigt werden, als auch erstmalig Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung während der Bearbeitung einer Aufgabe zur mentalen Rotation bei Kindern in diesem Alter dokumentiert werden. Es stellt sich somit zwangsläufig die Frage, ab welchem Alter einerseits die Amplitudenmodulationen und andererseits die beobachteten Unterschiede in der Hirnaktivität nachweisbar sind. Da Geschlechtsunterschiede auf der Verhaltensebene inzwischen auch bereits bei Säuglingen nachgewiesen werden konnten (Moore & Johnson, 2008; Quinn & Liben, 2008) könnten weitere Untersuchungen mit Hilfe elektrophysiologischer Verfahren diese Forschungslücke schließen.

Da in beiden Untersuchungen der vorliegenden Arbeit jeweils eine geblockte Präsentation der aufrechten bzw. der gedrehten Reize benutzt wurde, würde eine Überprüfung der Befunde in einem ungeblockten Design weiteren Aufschluss geben. Die Reaktionszeiten für aufrechte Stimuli, die in Blöcke eingebettet sind, in denen auch gedrehte Stimuli auftauchen, sind langsamer als jene von aufrechten Stimuli, die in reinen aufrechten Blöcken präsentiert werden (Ilan & Miller, 1994; Jansen-Osmann & Heil, 2007b). Da sich in beiden Untersuchungen keine Reaktionszeitdifferenzen zwischen den Ge-

schlechtern gezeigt haben, wäre es interessant zu sehen, ob sich hier Änderungen ergeben. Zudem wäre eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zur Mentalen Rotation gegeben, da diese überwiegend mit ungeblockten Präsentationen gearbeitet haben.

Die Frage nach dem Einfluss psycho-sozialer und biologisch-neuronaler Faktoren konnte erwartungsgemäß nicht beantwortet werden. Die vorliegenden Ergebnisse sprechen jedoch zumindest für einen gewichtigen biologisch-neuronalen Anteil. Es liegt nahe zu vermuten, dass auch schon bei wesentlich jüngeren Kindern Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung nachweisbar sind. Da ein wichtiger Faktor beim Zustandekommen dieser Unterschiede der vorgeburtliche Hormonspiegel sein könnte, wäre es interessant diesen und dessen Anteil am Zustandekommen von geschlechtsspezifischen Leistungsunterschieden, genauer zu untersuchen. Dies wäre beispielsweise in einem ersten Schritt über die Analyse von Sexualhormonen im Fruchtwasser (nach Amniozentesen) in Kombination mit der Untersuchung der räumlichen Fähigkeiten zu verschiedenen Zeitpunkten in der Kindheit möglich.

Auch ist nach wie vor nicht geklärt welche Strategien Kinder bei der Lösung mentaler Rotationsaufgaben verwenden und in wie weit Mädchen und Jungen hier Gebrauch von unterschiedlichen Strategien machen. Es gibt zwar Evidenz dafür, dass sich Männer eher einer holistischen und Frauen eher einer analytischen Strategie zu bedienen scheinen (z.B. Heil & Jansen-Osmann, 2008b), diese Befunde stammen jedoch aus Untersuchungen mit Erwachsenen und komplexem Stimulusmaterial und basieren auf Unterschieden in den Reaktionszeiten. Ob sich diese Erkenntnisse auch auf Vorschulkinder bei der Rotation von sehr einfachem Stimulusmaterial übertragen lassen ist fraglich. Um potenziell eingesetzte Strategien zu untersuchen bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten an, so beispielsweise, neben den Reaktionszeitanalysen, die Untersuchung mittels introspektiver Berichte (z.B. Cochran & Wheatley, 1989; Schultz, 1991), Blickbewegungsuntersuchungen (z.B. Deffner, 1985; Just & Carpenter, 1976, 1985) oder mittels Item-Response-Modellen (Glück et al., 2002).

3.2 Zusammenfassende Thesen

1. Die von Untersuchungen mit Erwachsenen bekannten rotationsabhängigen Amplitudeneffekte während mentaler Rotation finden sich bereits im Vorschulalter und zwar sowohl mit einfachem als auch für diese Altersgruppe schwierigerem Stimulusmaterial.

2. Die Sonderstellung von Buchstaben als Stimulusmaterial zeigt sich bereits im Vorschulalter. Bei Fünf- bis Sechsjährigen sind, ebenso wie häufig bei Erwachsenen, keine Geschlechtsunterschiede auf der Verhaltensebene beobachtbar.

3. Geschlechtsunterschiede in der Lateralisierung während mentaler Rotation sind bereits bei Vorschulkindern zu erkennen. In Bezug auf die Hirnaktivität der rechten Hemisphäre zeigen sich keine Unterschiede, deutliche Unterschiede sind jedoch linkshemisphärisch erkennbar.

4. Biologisch-neuronale Faktoren scheinen einen großen Anteil am Geschlechtseffekt zu haben. Zyklusbedingte Effekte scheinen Geschlechtsunterschiede zu modulieren, die bereits lange Zeit vor der Pubertät existieren.

4 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.
- Ashton, R., & McFarland, K. (1991). A simple dual-task study of laterality, sex-differences and handedness. *Cortex*, 27, 105-109.
- Baenninger, M., & Newcombe, N. (1989). The role of experience in spatial test performance: A meta-analysis. *Sex Roles*, 20, 327-344.
- 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.
- Berry, J. W. (1966). Temne and Eskimo perceptual skills. *International Journal of Psychology*, 1, 207-229.
- Beste, C., Heil, M., & Konrad, C. (2009). Individual differences in ERPs during mental rotation of characters: Lateralization, and performance level. *Brain and Cognition*, 72, 238-243.
- 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 & Biological Psychiatry*, 23, 669-682.
- Brosnan, M. J. (1998). The implications for academic attainment of perceived gender-appropriateness upon spatial task performance. *British Journal of Educational Psychology*, 68, 203-215.
- Brown, W. E., Kesler, S. R., Eliez, S., Warsofsky, I. S., Haberecht, M., & Reiss, A. L. (2004). A volumetric study of parietal lobe subregions in Turner syndrome. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 46, 607-609.

- Bryden, M. P., George, J., & Inch, R. (1990). Sex differences and the role of figural complexity in determining the rate of mental rotation. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 467-477.
- 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.
- Campbell, D. W., & Eaton, W. O. (1999). Sex differences in the activity level of infants. *Infant and Child Development*, 8, 1-17.
- Campos, A., & Cofan, E. (1986). Rotation of images and primary mental abilities: Influence of information and sex. *Perceptual and Motor Skills*, 63, 644-646.
- Casey, B. M., Andrews, N., Schindler, H., Kersh, J. E., Samper, A., & Copley, J. (2008). The development of spatial skills through interventions involving block building activities. *Cognition and Instruction*, 26, 269-309.
- 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.
- 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, W., & Polich, J. (1989). No hemispheric differences for mental rotation of letters or polygons. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27, 25-28.
- Cooper, L. A. (1975). Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive Psychology*, 7, 20-43.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1982). Chronometric studies of the rotation of mental images. In R. N. Shepard & L. A. Cooper (Eds.), *Mental images and their transformation* (pp. 72-121). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Corballis, M. C. (1986). Is mental rotation controlled or automatic? *Memory & Cognition*, 14, 124-128.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 57, 100-121.

- Corballis, M. C., & McLaren, R. (1984). Winding one's Ps and Qs: Mental rotation and mirror-image discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 318-327.
- Corballis, M. C., & Sergent, J. (1989). Hemispheric specialization for mental rotation. *Cortex*, 25, 15-25.
- 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.
- Deutsch, G., Bourbon, W. T., Papanicolaou, A. C., & Eisenberg, H. M. (1988). Visuospatial tasks compared via activation of regional cerebral blood flow. *Neuropsychologia*, 26, 445-452.
- Ditunno, P. L., & Mann, V. A. (1990). Right hemisphere specialization for mental rotation in normals and brain damaged subjects. *Cortex*, 26, 177-188.
- 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.
- Draganski, B., Gaser, C., Kempermann, G., Kuhn, H. G., Winkler, J., Buchel, C., et al. (2006). Temporal and Spatial Dynamics of Brain Structure Changes during Extensive Learning. *Journal of Neuroscience*, 26, 6314-6317.
- Dror, I. E., Kosslyn, S. M., & Waag, W. L. (1993). Visual-spatial abilities of pilots. *Journal of Applied Psychology*, 78, 763-773.
- Epting, L. K., & Overman, W. H. (1998). Sex-sensitive tasks in men and women: A search for performance fluctuations across the menstrual cycle. *Behavioral Neuroscience*, 112, 1304-1317.

- Estes, D. (1998). Young children's awareness of their mental activity: The case of mental rotation. *Child Development*, 69, 1345-1360.
- Farah, M. J., & Hammond, K. M. (1988). Mental rotation and orientation-invariant object recognition: Dissociable processes. *Cognition*, 29, 29-46.
- Fischer, S. C., & Pellegrino, J. W. (1988). Hemisphere differences for components of mental rotation. *Brain and Cognition*, 7, 1-15.
- Geschwind, N., & Galaburda, A. M. (1987). *Cerebral lateralization: Biological mechanism, associations, and pathology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ginn, S. R., & Pickens, S. J. (2005). Relationships between Spatial Activities and Scores on the Mental Rotation test as a Function of Sex. *Perceptual and Motor Skills*, 100, 877-881.
- 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.
- Goldstein, D., Haldane, D., & Mitchell, C. (1990). Sex differences in visual-spatial ability: The role of performance factors. *Memory & Cognition*, 18, 546-550.
- Goldstein, J. M., Seidman, L. J., Horton, N. J., Makris, N., Kennedy, D. N., Caviness, V. S., Jr., et al. (2001). Normal sexual dimorphism of the adult human brain assessed by in vivo magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, 11, 490-497.
- Güntürkün, O., & Hausmann, M. (2003). The dual coding hypothesis of human cerebral asymmetries. *Journal of Neurological Sciences*, 20, 140-150.
- Hampson, E., Rovet, J. F., & Altmann, D. (1998). Spatial reasoning in children with congenital adrenal hyperplasia due to 21-hydroxylase deficiency. *Developmental Neuropsychology*, 14, 299-320.
- Hänggi, J., Buchmann, A., Mondadori, C. R., Henke, K., Jäncke, L., & Hock, C. (2008). Sexual Dimorphism in the Parietal Substrate Associated with Visuospatial Cogni-

tion Independent of General Intelligence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 139-155.

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: A Journal of Neurology*, 123, 65-73.

Hausmann, M. (2005). Hemispheric asymmetry in spatial attention across the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, 43, 1559-1567.

Hausmann, M., & Bayer, U. (2009). Hormonelle Harmonie. *Gehirn & Geist*, 60-65.

Hausmann, M., Schoofs, D., Rosenthal, H. E., & Jordan, K. (2009). Interactive effects of sex hormones and gender stereotypes on cognitive sex differences-A psychobiosocial approach. *Psychoneuroendocrinology*, 34, 389-401.

Hausmann, M., Slabbekoorn, D., Van Goozen, S. H., Cohen-Kettenis, P. T., & Güntürkün, O. (2000). Sex hormones affect spatial abilities during the menstrual cycle. *Behavioral Neuroscience*, 114, 1245-1250.

Hegarty, M., & Waller, D. A. (2005). Individual Differences in Spatial Abilities. In *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (pp. 121-169). 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-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. (2008a). Gender differences in mathematical performance and mental rotation in 8 years old boys and girls. *European Journal of Developmental Science*, 2, 195-201.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (2008b). Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: Do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 683-689.
- Heil, M., Kavšek, M., Rolke, B., Beste, C., & Jansen, P. (2010). Mental rotation in female fraternal twins: Evidence for intra-uterine hormone transfer? *Manuscript submitted for publication*.
- Heil, M., & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414-422.
- Heil, M., Rösler, F., Link, M., & Bajric, J. (1998). What is improved if a mental rotation task is repeated--the efficiency of memory access, or the speed of a transformation routine? *Psychological Research*, 61, 99-106.
- Hines, M., Brook, C., & Conway, G. S. (2004). Androgen and psychosexual development: Core gender identity, sexual orientation, and recalled childhood gender role behavior in women and men with congenital adrenal hyperplasia (CAH). *Journal of Sex Research*, 41, 75-81.
- Hines, M., Fane, B. A., Pasterski, V. L., Matthews, G. A., Conway, G. S., & Brook, C. (2003). Spatial abilities following prenatal androgen abnormality: Targeting and mental rotations performance in individuals with congenital adrenal hyperplasia. *Psychoneuroendocrinology*, 28, 1010-1026.
- Howard, R., Fenwick, P., Brown, D., & Norton, R. (1992). Relationship between CNV asymmetries and individual differences in cognitive performance, personality and gender. *International Journal of Psychophysiology*, 13, 191-197.
- Hugdahl, K., & Davidson, R. J. (2002). *Brain asymmetry*. MIT Press, Cambridge.
- Hugdahl, K., Thomsen, T., & Ersland, L. (2006). Sex differences in visuo-spatial processing: an fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia*, 44, 1575-1583.

- Ilan, A. B., & Miller, J. (1994). A violation of pure insertion: Mental rotation and choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 520-536.
- Inhelder, B., & Piaget, J. (1958). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence*. Basic, New York.
- 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). Maintaining readiness for mental rotation interferes with perceptual processes in children but with response selection in adults. *Acta Psychologica*, 126, 155-168.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007c). 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 Neurophysiology*, 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, E. S., & Meade, A. C. (1987). Developmental patterns of spatial ability: An early sex difference. *Child Development*, 58, 725-740.
- 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., Wustenberg, 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., Pellegrino, J., & Carter, P. (1980). Developmental changes in mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 29, 102-116.
- Kimura, D. (1992). Sex differences in the brain. *Scientific American*, 267, 118-125.
- Koriat, A., & Norman, J. (1985). Mental rotation and visual familiarity. *Perception & Psychophysics*, 37, 429-439.
- Kosslyn, S. M., Margolis, J. A., Barrett, A. M., Goldknopf, E. J., & Daly, P. F. (1990). Age differences in imagery abilities. *Child Development*, 61, 995-1010.
- Lange, L. F., Heil, M., & Jansen, P. (2010). Does children's left hemisphere lateralization during mental rotation depend upon the stimulus material? *Journal of Individual Differences*, 31, 91-94.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A., & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, 35, 940-949.
- Liben, L. S., Susman, E. J., Finkelstein, J. W., Chinchilli, V. M., Kunselman, S., Schwab, J., et al. (2002). The effects of sex steroids on spatial performance: A review and an experimental clinical investigation. *Developmental Psychology*, 38, 236-253.
- 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.
- Marmor, G. S. (1977). Mental rotation and number conservation: Are they related? *Developmental Psychology*, 13, 320-325.
- Massa, L. J., Mayer, R. E., & Bohon, L. M. (2005). Individual differences in gender role beliefs influence spatial ability test performance. 2005. *Learning and Individual Differences*, 15, 99-111.
- McCormick, C. M., & Teillon, S. M. (2001). Menstrual cycle variation in spatial ability: Relation to salivary cortisol levels. *Hormones and Behavior*, 39, 29-38.

- McGlone, J. (1978). Sex differences in functional brain asymmetry. *Cortex*, 14, 122-128.
- McGlone, J. (1980). Sex differences in human brain asymmetry: A critical survey. *Behavioral and Brain Sciences*, 3, 215-227.
- Mehta, Z., & Newcombe, F. (1991). A role for the left hemisphere in spatial processing. *Cortex*, 27, 153-167.
- Merz, F. (1979). *Geschlechtsunterschiede und ihre Entwicklung*. Göttingen, Toronto, Zürich: Hogrefe.
- 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.
- Milivojevic, B., Hamm, J. P., & Corballis, M. C. (2008). Functional Neuroanatomy of Mental Rotation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 945-959.
- Miller, S. L., & Wood, F. B. (1995). Electrophysiological indicants of black-white discrimination performance for letter and non-letter patterns. *The International Journal of Neuroscience*, 80, 299-316.
- Molko, N., Cachia, A., Riviere, D., Mangin, J. F., Bruandet, M., LeBihan, D., et al. (2004). Brain anatomy in Turner syndrome: evidence for impaired social and spatial-numerical networks. *Cerebral Cortex*, 14, 840-850.
- Monahan, J. S., Harke, M. A., & Shelley, J. R. (2008). Computerizing the mental rotations test: Are gender differences maintained? *Behavior Research Methods*, 40, 422-427.
- Moore, D. S., & Johnson, S. P. (2008). Mental rotation in human infants: A sex difference. *Psychological Science*, 19, 1063-1066.
- Papanicolaou, A. C., Deutsch, G., Bourbon, W. T., & Will, K. W. (1987). Convergent evoked potential and cerebral blood flow evidence of task-specific hemispheric differences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66, 515-520.
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., et al. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42, 555-562.

- 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.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1956). *The child's conception of space*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). The rate of mental rotation of images: A test of a holistic analogue hypothesis. *Memory & Cognition*, 7, 19-28.
- Quinn, P. C., & Liben, L. S. (2008). A sex difference in mental rotation in young infants. *Psychological Science*, 19, 1067-1070.
- Ratcliff, G. (1979). Spatial thought, mental rotation and the right cerebral hemisphere. *Neuropsychologia*, 17, 49-54.
- Resnick, S. M., Berenbaum, S. A., Gottesman, I. I., & Bouchard, T. J. (1986). Early hormonal influences on cognitive functioning in congenital adrenal hyperplasia. *Developmental Psychology*, 22, 191-198.
- Roberts, J. E., & Bell, M. A. (2000). Sex differences on a mental rotation task: Variations in electroencephalogram hemispheric activation between children and college students. *Developmental Neuropsychology*, 17, 199-223.
- Roberts, J. E., & Bell, M. A. (2002). The effects of age and sex on mental rotation performance, verbal performance and brain electrical activity. *Developmental Psychobiology*, 40, 391-407.
- Roberts, 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.
- Rosenberg, L., & Park, S. (2002). Verbal and spatial functions across the menstrual cycle in healthy young women. *Psychoneuroendocrinology*, 27, 835-841.
- Rösler, F., Heil, M., Pauls, A. C., Bajric, J., & Hennighausen, E. (1994). Individual differences in spatial cognition: Evidence from slow event-related brain potentials. In D. Bartussek & M. Amelang (Eds.), *Fortschritte der Differentiellen Psychologie und Psychologischen Diagnostik* (pp. 115-129). Göttingen: Hogrefe.

- 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.
- Schöning, S., Engelien, A., Kugel, H., Schafer, S., Schiffbauer, H., Zwitserlood, P., et al. (2007). Functional anatomy of visuo-spatial working memory during mental rotation is influenced by sex, menstrual cycle, and sex steroid hormones. *Neuropsychologia, 45*, 3203-3214.
- Schultz, K. (1991). The contribution of solution strategy to spatial performance. *Canadian Journal of Psychology, 45*, 474-491.
- Seurinck, R., Vingerhoets, G., de Lange, F. R., & Achten, E. (2004). Does egocentric mental rotation elicit sex differences? *Neuroimage, 23*, 1440-1449.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science, 171*, 701-703.
- Signorella, M. L., Jamison, W., & Krupa, M. H. (1989). Predicting spatial performance from gender stereotyping in activity preferences and in self-concept. *Developmental Psychology, 25*, 89-95.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience, 6*, 767-773.
- Van Strien, J., & Bouma, A. (1990). Mental Rotation of laterally presented random shapes in males and females. *Brain and Cognition, 12*, 297-303.
- Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin, 117*, 250-270.
- Wechsler, D. (1955). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale*. Psychological Corporation, New York.
- 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.

- Williams, C. L., & Meck, W. H. (1991). The organizational effects of gonadal steroids on sexually dimorphic spatial ability. *Psychoneuroendocrinology*, 16, 155-176.
- Witkin, H. A., Oltman, P. K., Raskin, E. & Karp, S. A. . (1971). *Manual for the Embedded Figures Test, Children's Embedded Figures Test, and Group Embedded Figures Test*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Yuille, J. C., & Steiger, J. H. (1982). Nonholistic processing in mental rotation: Some suggestive evidence. *Perception & Psychophysics*, 31, 201-209.

5 Einzelarbeiten

5.1 Experiment 1

Hahn, N., Jansen, P., & Heil, M. (2010). Preschoolers' Mental Rotation: Sex Differences in Hemispheric Asymmetry. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 1244-1250.

5.2 Experiment 2

Hahn, N., Jansen, P., & Heil, M. (in press). Preschoolers' mental rotation of letters: Sex differences in hemispheric asymmetry. *Cognitive Neuroscience*.

Preschoolers' Mental Rotation: Sex Differences in Hemispheric Asymmetry

Nicola Hahn^{1,2}, Petra Jansen¹, and Martin Heil²

Abstract

■ Mental rotation performance has been found to produce one of the largest sex differences in cognition accompanied by sex differences in functional cerebral asymmetry. Although sex differences in mental rotation performance can be reliably demonstrated as early as age 5 years old, that is, long before puberty, no data exist as to whether preschooler's mental rotation performance is accompanied by sex differences in functional cerebral

asymmetry. Based on the electrophysiological brain correlates of mental rotation, we observed a bilateral parietal brain activity for preschool boys whereas the preschool girls' brain activity was clearly lateralized toward the left hemisphere if and only if mental rotation was needed to solve the task. Thus, sex differences in functional cerebral asymmetry during mental rotation do not require hormonal changes that occur during puberty. ■

INTRODUCTION

Sex differences in spatial cognition, especially in mental rotation, that is, imagining an object turning around (Heil, Bajric, Rösler, & Hennighausen, 1997; Shepard & Metzler, 1971), constitute an empirical fact (Linn & Petersen, 1985), although the effect size depends upon the stimulus material (Voyer, Voyer, & Bryden, 1995) and whether accuracy or speed data are used as dependent variables (Jansen-Osmann & Heil, 2007c). The causes for the sex effect, however, are still far from being understood. Both "psycho-social" as well as "biological-neuronal" explanations can quote empirical support and are by no means mutually exclusive. In this article, discussion will be restricted to sex differences in functional cerebral asymmetry.

Hemispheric lateralization of brain activity during mental rotation as a function of sex was reported rather consistently (Hugdahl, Thomsen, & Erslund, 2006; Seurinck, Vingerhoets, de Lange, & Achten, 2004; Jordan, Wustenberg, Heinze, Peters, & Jäncke, 2002), with—as a rule—a larger right parietal activity observed in men and a larger left parietal activity in women. Compelling data from diverse fields (neuroendocrinology, psychology, neurology, genetics, neurochemistry, and neuroanatomy) and numerous species including humans indicate that the brain is a sexually differentiated organ. Sex hormones have organizational effects on brain structure and function and also have subsequent activational effects on the brain (Carne, Vogrin, Litewka, & Cook, 2006; Güntürkün & Hausmann, 2003; Williams & Meck, 1991). The latter has repeatedly been demonstrated by the observation that the continuous steroid fluctuations

in normally cycling women lead to concomitant changes of sex differences both in performance (Hausmann et al., 2006; Halari et al., 2005; Hausmann, Slabbekoorn, Van Goozen, Cohen-Kettenis, & Güntürkün, 2000) and in cerebral asymmetries (Schöning et al., 2007; Hausmann, 2005). Evidence for the former statement, however, is less conclusive (Güntürkün & Hausmann, 2003). Moreover, it is still completely unknown whether the continuous steroid fluctuations in cycling women cause or modify these sex differences. In the former case, one would expect no sex differences before puberty whereas in the latter case these sex differences should already exist in early childhood. The existence of such effects long before puberty would constitute indirect evidence for organizational effects of pre- and postnatal sex hormones on cerebral asymmetry—although alternative explanations exist, see below—but such data are simply absent.

Given a sufficient statistical power, male superior performance in mental rotation can already be observed in children as young as 5 or 6 years old (Casey et al., 2008; Levine, Huttenlocher, Taylor, & Langrock, 1999). Whether these early sex effects are or are not accompanied by a differential hemispheric lateralization, however, has not been reported yet at all. Therefore, we analyzed mental rotation-related amplitude effects of ERPs extracted from the EEG in 5-year-old children. The advantages of this approach are that ERP recordings are completely noninvasive and required sample sizes to obtain sufficient statistical power are realizable. In fact, $n = 96$ participants are needed assuming a large sex effect of $d = .75$ and levels of $\alpha = \beta = .05$. Moreover, the amplitude effects used here are highly specific for mental rotation (Heil, 2002); for example, the presence of the amplitude effect depends upon the presence of mental rotation (Heil, Bajric, Rösler,

¹University of Regensburg, Germany, ²Heinrich-Heine University, Düsseldorf, Germany

& Hennighausen, 1996) but is independent from the presence of an overt response (Heil, Rauch, & Hennighausen, 1998). Heil and Rolke (2002) provided evidence that not only the process of mental rotation but also the amplitude modulation itself was delayed, either when the perceptual quality of the stimulus was reduced or when character discrimination was more difficult. In addition, the amplitude effect was already successfully used for measuring functional parietal asymmetry in children (Heil & Jansen-Osmann, 2007; Jansen-Osmann & Heil, 2007a). Finally, the ERPs in the present study were recorded in a preschool setting, thus avoiding the unfamiliar and probably intimidating lab environment. Taken together, at least in the case of sex differences in preschoolers during mental rotation, these advantages outweigh the limited spatial resolution of ERPs compared with, for example, fMRI.

In the present study, blocks with upright versus blocks with rotated pairs of animal drawings were presented, and the children had to decide whether the two drawings were the same or mirror reversed. RTs, error rates, and average ERP amplitudes were recorded. Hemispheric lateralization was determined by comparing the mental rotation-related amplitude modulations over the left versus the right parietal electrode leads (P3 vs. P4).

METHODS

We recorded ERPs in 97 children in two different types of trials: In upright trials, subjects had to decide whether two upright animal drawings were the same or mirror reversed. In rotated trials, the right animal additionally was rotated in the picture plane, and subjects had to rely on mental rotation to solve the task.

Participants

In five preschools in the area of Düsseldorf, Germany, 104 children (age range = 4.8 to 6.1 years) participated in the study after their parents signed informed consent. Data of seven children had to be excluded because of less than 60 artifact-free and correctly answered trials per upright and rotated condition (five children) or because of technical problems during EEG acquisition (two children). The final sample comprised 47 girls (mean age = 5.3 years) and 50 boys (mean age = 5.4 years).

Materials

The experiment was run on a PC laptop with a 15-in. monitor located approximately 50 cm in front of the children. The experimental stimuli consisted of colored drawings of 12 different animals (camel, crocodile, dog, donkey, elephant, grizzly, lion, pig, rhino, sheep, turtle, and zebra; taken 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 identical or mirror reversed. In the upright blocks, the right drawing was also presented upright. In the rotated blocks, the right drawing was rotated 90°, 180°, or 270°. Participants responded “identical” by pressing the left mouse button and “mirror reversed” by pressing the right one. This simpler response assignment (see, e.g., Jansen-Osmann & Heil, 2007b) was the same for all participants. In addition, participants were free to use two fingers of the left hand or of the right hand or to use one finger from each hand, and in fact, children varied their response assignment during the course of the experiment. This reduction of experimental control constituted a concession to the fact that 5-year-olds completed 240 trials.

Procedure and Task

Participants were tested individually in a quiet room of their particular preschool. Before the experiment was started, the required decision (identical vs. mirror reversed) was explained in the following way: First, articles with two upright drawings of the same animal either facing into the same or into opposite directions were presented, and the children were instructed that their task was to decide whether the two drawings of the animal were facing into the same direction. Thereafter, sheets of article with one upright animal drawing on the left and one (moveable) rotated drawing on the right were presented. Now children had the opportunity to manually rotate the right drawing to understand the required decision, that is, whether the two drawings of the animal were facing into the same direction when standing on their feet.

In each trial, a pair of drawings was presented 1 sec after presentation of a fixation point. The drawings remained visible until a button press response and were then replaced by a “+” or “–” for 500 msec, indicating the correctness of the response. Trials were separated by randomly varying intervals of 2–3 sec. In addition, after every eight trials, participants were free to take a break. Two hundred forty trials were presented in four blocks. Blocks 1 and 4 consisted of 48 trials, each with upright stimuli only [12 (animals) × 2 (left one facing left vs. right) × 2 (right one identical vs. mirror reversed)]. Blocks 2 and 3 consisted of 72 trials each with rotated stimuli only [12 (animals) × 2 (right one identical vs. mirror reversed) by the three different angular disparities; the assignment of facing of the left animal to Block 2 versus Block 3 was determined randomly for each subject and for each of the 72 combinations mentioned above]. Each block was preceded by 16 practice trials with animal drawings not used in the test sessions to familiarize the children with the respective task. The whole experiment, including electrode application (see below) and removal, lasted less than 1.5 hr.

ERP Recording and Analysis

The EEG was recorded from nine Ag/AgCl electrodes placed at F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, and P4, respectively, based on the international 10–20 system (Jasper, 1958). All electrodes were attached directly to the scalp and were referenced to digitally averaged earlobes. Impedance was kept below 10 k Ω . To control for eye movement artifacts, vertical and horizontal electrooculogram was recorded. A ground electrode was placed at the right mastoid. Digitization rate was 250 Hz and an on-line band-pass was set from DC to 100 Hz. A digital off-line filter was set from 0.53 to 40 Hz. Continuous EEG was segmented into epochs of 1500 msec length starting 200 msec before stimulus presentation. The EEG was corrected for blinks and eye movements (Gratton, Coles, & Donchin, 1983). Automatic artifact rejection excluded epochs if voltage steps between two sampling points exceeded 80 μ V, if absolute amplitude exceeded ± 175 μ V, if absolute voltage difference within a segment exceeded 225 μ V, or if activity was less than 5 μ V for a time epoch longer than 150 msec. ERPs were extracted by averaging single trials with correct responses separately for subjects and upright versus rotated trials. On the basis of previous studies (e.g., Heil & Jansen-Osmann, 2007), the mental rotation-related amplitude effect was quantified as the mean voltage in the time window 500–800 msec after stimulus onset referenced to a prestimulus baseline of 200 msec. The pattern of significant results, however, did not change when a more fine grained temporal analysis or a more prolonged one was used.

RESULTS

With error rate as the dependent variable, an ANOVA was calculated with the between-subjects factor “sex” and the within-subjects factors “upright versus rotated trials” and “first versus second half of the experiment.” Boys outperformed girls with respect to accuracy only when rotated pairs of drawings were presented, resulting in a significant interaction of sex and upright versus rotated trials, $F(1,95) = 4.64$, $p < .05$, $d = .44$, see Figure 1. No other main effect or interaction turned out to be significant, $F(1,95) < 1.5$, $p > .30$.

Only trials with correct responses were used for RT analysis. Before the analysis, RT data were trimmed for outliers. RTs more than 1.5 SD s above or below the mean per condition and per subject were excluded (12.9% of the data, on average). One ANOVA was based on the inverse of the slope of the regression line, calculated separately for each participant, relating RT to angular disparity, expressed as degrees per second. A second ANOVA was based on the intercept of the regression line. ANOVAs were calculated with the between-subjects factor “sex” and the within-subjects factor “first versus second half of the experiment.” Neither the mental rotation speed ($M = 138.7^\circ/\text{sec}$, $SE = 17.4^\circ/\text{sec}$) nor the inter-

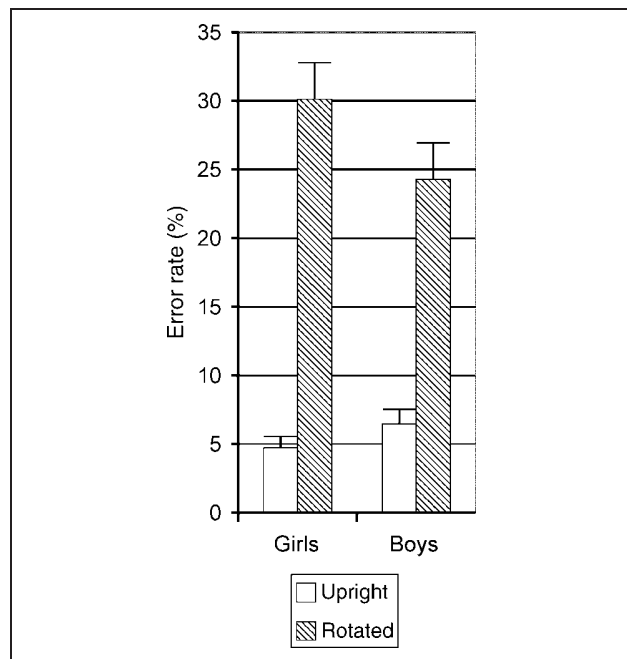


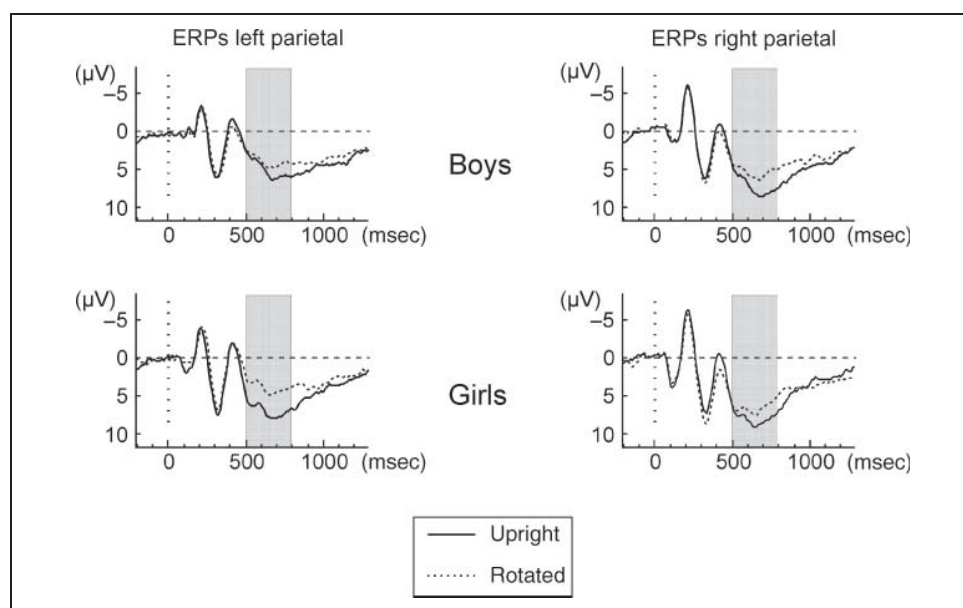
Figure 1. Behavioral performance. Error rates as a function of sex and orientation.

cept ($M = 2145.7$ msec, $SE = 64.2$ msec) was affected by sex, $F(1,95) = 1.14$ and 0.98 , respectively, or by the interaction of sex and half, $F(1,95) = 1.04$ and 0.46 , all $p > .30$, all $d < .25$. This pattern of effects did not change when untrimmed RT data were used for the regression analysis, $F(1,95) = 0.84$ and 0.62 , respectively, both $p > .30$, $d < .20$.

With respect to brain imaging data, an ANOVA for upright trials with the between-subjects factor “sex” and the within-subjects factors caudality (frontal vs. central vs. parietal electrodes) and laterality (left vs. right electrodes) revealed only a significant main effect of caudality, $F(2,190) = 10.48$, $p < .05$. Neither sex, $F(1,95) = 1.06$, nor laterality, $F(1,95) = 0.69$, both $p > .30$, affected ERP amplitudes for upright stimuli.

A second ANOVA was calculated with the additional electrical brain activity observed when mental rotation was required, that is, with the difference between rotated and upright trials. In addition to a significant two-way interaction of sex by laterality, $F(1,95) = 7.32$, $p < .01$, a significant three-way interaction of sex by laterality by caudality was obtained, $F(2,190) = 3.47$, $p < .05$. The increase in brain activity due to mental rotation differed as a function of sex and laterality at parietal leads, $F(1,95) = 10.62$, $p < .01$, see Figure 2. The sex effect of this hemispheric lateralization amounted to $d = .65$. Sex-dependent hemispheric lateralization was absent at frontal leads, $F(1,95) = 0.48$, $p > .30$, $d = .11$, and missed significance at central leads, $F(1,95) = 3.09$, $p > .08$, $d = .36$. At parietal leads, boys revealed a more bilateral pattern of brain activity, $F(1,49) = 2.71$, $p > .10$, with only

Figure 2. ERP effects. ERPs at left (P3) and right (P4) electrode leads as a function of orientation separately for boys and girls. Stimulus presentation was at $t = 0$ msec, negativity is up. The interval used as dependent variable is highlighted.



a numerically higher right parietal activation. Girls' brain activity, however, was clearly lateralized toward the left parietal hemisphere, $F(1,46) = 8.03, p < .01$, see Figure 3.

DISCUSSION

The well-know amplitude modulation primarily at parietal leads as a function of mental rotation consistently observed

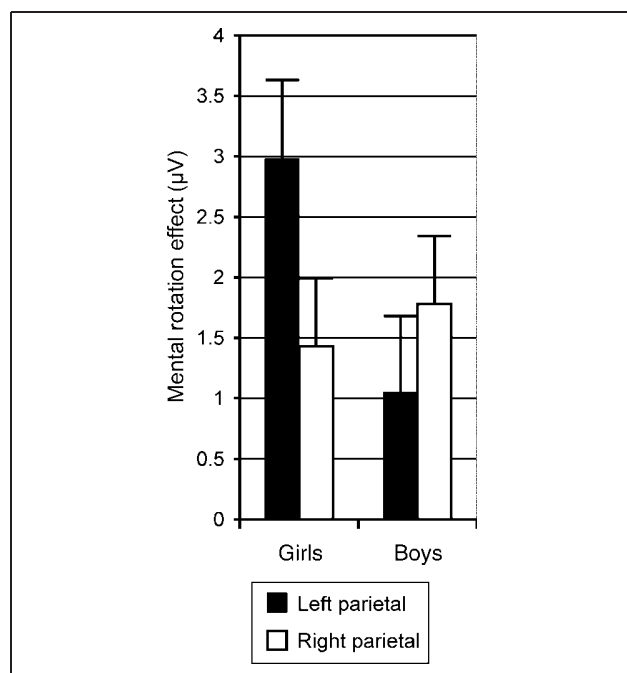


Figure 3. Sex-related hemispheric asymmetry during mental rotation. Mental rotation effects (difference in amplitude of upright vs. rotated trials) as a function of sex and hemisphere.

with adults (e.g., Bajric, Rösler, Heil, & Hennighausen, 1999) was replicated in the present study with children as young as 5 or 6 years. Although in the time range of the late positive complex (500–800 msec poststimulus), this effect should not be understood as a P300 modulation. Instead, existing evidence strongly suggests that the effect is caused by a modulation of a slow negativity that should be taken as a direct physiological correlate of the mental rotation process itself, as originally suggested by Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, and Mulder (1989; for a review of the evidence, see Heil, 2002). Negativity in the slow ERP usually is understood as an increase of neural activity in the underlying cortex (e.g., Rösler, Heil, & Röder, 1997).

Most importantly, the present study extends the findings of a hemispheric lateralization during mental rotation as a function of sex in adults toward children as young as 5 years. Thus, although menstrual cycle-related activating effects of sex hormones on sex differences in hemispheric lateralization were reported (see, e.g., Schöning et al., 2007; Hausmann, 2005), a fundamental sex difference in hemispheric lateralization of spatial cognition exists long before puberty. Thus, menstrual cycle effects in postpuberty samples modulate sex differences in hemispheric lateralization that already existed before puberty-related sex hormone activation. The main finding of the present study thus is straightforward, its theoretical consequences, however, are far from being understood. One might claim that the finding, admittedly indirectly, suggests the organizing influence of early—probably postnatal rather than prenatal—differential exposure to sex hormones (Falter, Arroyo, & Davis, 2006; Hines et al., 2003), but this interpretation is not obligatory.

Given the theoretical impetus these results eventually might have regarding early hormonal effects, a number of qualifications have to be discussed: First of all, although

the pattern of results can be understood as sex differences in hemispheric lateralization, one might also argue that the main result is a sex difference in left hemisphere activation during mental rotation. Therefore, it would be interesting to see whether the (in the present study nonsignificant) trend toward a larger right than left hemisphere activation for boys might be replicated in further studies. If not, one might suggest that the left-lateralized brain activity in girls might be understood as a consequence of girls' language development usually being ahead of boys'. As an indirect test of this assumption, we calculated the correlation between children's age and the hemispheric asymmetry of the amplitude modulation as a function of stimulus orientation for the whole sample as well as separately for both sex. In fact, none of these three correlations turned out to be significantly different from zero ($r < .15$, $p > .25$). Thus, we conclude that the available data from our experiment do not support the assumption that the age-correlated level of language development affects sex differences in hemispheric lateralization during mental rotation. In addition, the absence of significant correlations between age and hemispheric lateralization does also indirectly address the possibility that the mature profiles of laterality (left with female and right with male participants) emerge earlier for girls than for boys. We cannot exclude this possibility, but at least in the restricted age range realized in the present study (4.8 to 6.1 years), no evidence is observed for this interpretation.

The most important theoretical problem, however, is the fact that the causal link between sex differences in mental rotation and sex differences in hemispheric lateralization, although plausible indeed (see, e.g., Bayer, Kessler, Güntürkün, & Hausmann, 2008), still has to be fully validated. Especially, the question arises as to whether sex differences in hemispheric lateralization are the cause of or an effect of sex differences in mental rotation. If sex-specific strategies of solving mental rotation tasks exist, then the neuroscientific approach that suggests a causal link between brain activation and performance might be replaced by a cognitive approach suggesting a causal link between cognitive processing strategies and performance with brain activation being understood as an effect instead. In fact, some evidence exists suggesting that men generally tend to use more holistic strategies whereas women tend to prefer analytic strategies (e.g., Heil & Jansen-Osmann, 2008; Thomsen et al., 2000) that in turn might cause sex-specific lateralization patterns. This evidence, however, originates from studies with adults and with complex stimuli and is based on sex differences in mental rotation speed. It is completely open as to whether these sex-related strategy differences exist at all in preschoolers tested with relatively simple stimuli. In the present study, we obtained no evidence in favor of sex-related strategy differences because mental rotation speed was not affected by sex. New ideas and creative experimental designs are needed to learn more about the causes and effects of sex differences in hemispheric lateralization. Our results at

least provide the opportunity to investigate these questions independent of modulating menstrual cycle effects.

The question arises, however, whether sex differences in functional hemispheric lateralization are based upon sex differences in structural asymmetry. Recent evidence by Hänggi et al. (2008) suggests a very interesting link between structural and functional lateralization: In women, visuospatial cognition was predominantly correlated with left parietal gray matter volume differences reflecting a relative increase in the somatodendritic tissue necessary for information processing. In men, however, visuospatial cognition was predominantly correlated with right parietal white matter volume differences reflecting a relative increase in connecting axons necessary for transportation of information (Gur et al., 1999). For a detailed review of the evidence in favor of a parietal sexual dimorphism hypothesis with respect to relative gray versus white matter volume differences, see Hänggi et al. (2008).

Even if one accepts the causal role of sex differences in functional hemispheric lateralization based upon sex differences in structural asymmetry, however, the question emerges whether these sex differences are caused genetically or rather hormonally or as a result of experience and usage-dependent neural plasticity. Genetic and hormonal factors may have considerable effects on, among others, neural networks relevant for spatial cognition. For example, women with Turner syndrome (X-chromosome deficiency) are impaired in spatial cognition and exhibit structural anomalies in the parietal lobes (Brown et al., 2004; Molko et al., 2004). Besides genetic factors, sex hormones exert considerable effects on spatial cognition, at least in women (Bayer et al., 2008; Sherwin, 2003), and modulate gray and white matter volumes even in the parietal lobes (Goldstein et al., 2001).

However, experimental evidence also suggests that learning- and training-induced cortical plasticity is also accompanied at a structural level by an increase in gray matter volume (e.g., Draganski et al., 2004, 2006), reflecting an increase in somatodendritic tissue. Because boys move more frequently than girls (Campbell & Eaton, 1999), boys encounter more differentiated environments that place greater demands on neural networks responsible for spatial cognition. Additional studies revealed that sex-stereotyped space-related activities predict visuospatial performance and that women improve in spatial cognition when engaged in male-associated space-related activities (Ginn & Pickens, 2005; Devlin, 2004; Signorella, Jamison, & Hansen Krupa, 1989; but see Heil, Rösler, Link, & Bajric, 1998). Thus, whether sex differences in functional and structural hemispheric lateralization are caused by biological (genetic, hormonal) or environmental (spatial activities, socialization) factors remains to be answered (e.g., Casey, Nuttall, & Pezaris, 1999).

All of the theoretical questions, problems, and even pitfalls mentioned above, however, are in no way exclusive to mental rotation, but in fact apply to cognitive neuroscience as a whole field. We look with optimism to the

future of mental rotation research because we truly believe that this experimental paradigm might act as a prime example for solving these fundamental questions of cognitive neuroscience, thanks to the many fields within both psychology, biology, and neurosciences dealing with this aspect of spatial cognition for some time.

In summary, the present study provides evidence for a sex-related hemispheric lateralization during mental rotation in children as young as 5 years. Thus, a fundamental sex difference in hemispheric lateralization of spatial cognition exists long before puberty. Menstrual cycle effects in postpuberty samples modulate sex differences in hemispheric lateralization that already existed before puberty-related sex hormone activation.

Acknowledgments

We thank B. Rolke, K. Lange, and two anonymous reviewers for their helpful comments. This work was supported by grants from the German Research Foundation (DFG) and from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) to P. J. and M. H.

Reprint requests should be sent to Prof. Dr. Petra Jansen, Department of Sport Science, University of Regensburg, 93040 Regensburg, Germany, or via e-mail: Petra.Jansen@psk.uni-regensburg.de.

REFERENCES

- 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.
- Bayer, U., Kessler, N., Güntürkün, O., & Hausmann, M. (2008). Interhemispheric interaction during the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, *46*, 2415–2422.
- Brown, W. E., Kesler, S. R., Eliez, S., Warsofski, I. S., Haberecht, M., & Reiss, A. L. (2004). A volumetric study of parietal lobe subregions in Turner syndrome. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *46*, 607–609.
- Campbell, D. W., & Eaton, W. O. (1999). Sex differences in the activity level of infants. *Infant and Child Development*, *8*, 1–17.
- Carne, R. R., Vogrin, S., Litewka, L., & Cook, M. J. (2006). Cerebral cortex: An MRI-based study on volume and variance with age and sex. *Journal of Clinical Neuroscience*, *13*, 60–72.
- Casey, M. B., Andrews, N., Schindler, H., Kersh, J. E., Samper, A., & Copley, J. (2008). The development of spatial skills through interventions involving block building activities. *Cognition and Instruction*, *26*, 269–309.
- Casey, M. B., Nuttall, R. L., & Pezaris, E. (1999). Evidence in support of a model that predicts how biological and environmental factors interact to influence spatial skills. *Developmental Psychology*, *35*, 1237–1247.
- Devlin, A. S. (2004). Sailing experience and sex as correlates of spatial abilities. *Perceptual and Motor Skills*, *98*, 365–371.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Changes in grey matter induced by training. *Nature*, *427*, 311–312.
- Draganski, B., Gaser, C., Kempermann, G., Kuhn, H. G., Winkler, J., Büchel, C., et al. (2006). Temporal and spatial dynamics of brain structure changes during extensive learning. *Journal of Neuroscience*, *26*, 6314–6317.
- Falter, C. M., Arroyo, M., & Davis, G. J. (2006). Testosterone: Activation or organization of spatial cognition? *Biological Psychology*, *73*, 132–140.
- Ginn, S. R., & Pickens, S. J. (2005). Relationships between spatial activities and scores on the mental rotation test as a function of sex. *Perceptual and Motor Skills*, *100*, 877–881.
- Goldstein, J. M., Seidman, J. L., Horton, N. J., Makris, N., Kennedy, D. N., Caviness, V. S., et al. (2001). Normal sexual dimorphism of the adult human brain assessed by in vivo magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, *11*, 490–497.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *55*, 468–484.
- Güntürkün, O., & Hausmann, M. (2003). The dual coding hypothesis of human cerebral asymmetries. *Journal of Neurological Sciences*, *20*, 140–150.
- Gur, R. C., Turetsky, B. I., Matsui, M., Yan, M., Bilker, W., Hughett, P., et al. (1999). Sex differences in brain gray and white matter in healthy young adults: Correlations with cognitive performance. *Journal of Neuroscience*, *19*, 4065–4072.
- Halari, R., Hines, M., Kumari, V., Mehrotra, R., Wheeler, M., Ng, V., et al. (2005). Sex differences and individual differences in cognitive performance and their relationship to endogenous gonadal hormones and gonadotropins. *Behavioral Neuroscience*, *119*, 104–117.
- Hänggi, J., Buchmann, A., Mondadori, C. R. A., Henke, K., Jäncke, L., & Hock, C. (2008). Sexual dimorphism in the parietal substrate associated with visuospatial cognition independent of general intelligence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*, 139–155.
- Hausmann, M. (2005). Hemispheric asymmetry in spatial attention across the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, *43*, 1559–1567.
- 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.
- Hausmann, M., Tegenthoff, M., Sanger, J., Janssen, F., Güntürkün, O., & Schwenkreis, P. (2006). Transcallosal inhibition across the menstrual cycle: A TMS study. *Clinical Neurophysiology*, *117*, 26–32.
- 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-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? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*, 683–689.

- 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., & Rolke, B. (2002). Towards a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414–422.
- Heil, M., Rösler, F., Link, M., & Bajric, J. (1998). What is improved, if a mental rotation task is repeated—Efficiency of memory access, or the speed of a transformation routine? *Psychological Research*, 61, 99–108.
- Hines, M., Fane, B. A., Pasterski, V. L., Mathews, G. A., Conway, G. S., & Brook, C. (2003). Spatial abilities following prenatal androgen abnormality: Targeting and mental rotations performance in individuals with congenital adrenal hyperplasia. *Psychoneuroendocrinology*, 28, 1010–1026.
- Hugdahl, K., Thomsen, T., & Ersland, L. (2006). Sex differences in visuo-spatial processing: An fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia*, 44, 1575–1583.
- 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). Maintaining readiness for mental rotation interferes with perceptual processes in children but with response selection in adults. *Acta Psychologica*, 126, 155–168.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007c). 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. H. (1958). Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371–375.
- Jordan, K., Wustenberg, 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.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A., & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, 35, 940–949.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479–1498.
- Molko, N., Cachia, A., Riviere, D., Mangin, J.-F., Bruandet, M., LeBihan, D., et al. (2004). Brain anatomy in Turner syndrome: Evidence for impaired social and spatial-numeric networks. *Cerebral Cortex*, 14, 840–850.
- 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. (2004). Revisiting Snodgrass and Vanderwart's object pictorial set: The role of surface detail in basic-level object recognition. *Perception*, 33, 217–236.
- Schöning, S., Engelien, A., Kugel, H., Schäfer, S., Schiffbauer, H., Zwieterlood, P., et al. (2007). Functional anatomy of visuo-spatial working memory during mental rotation is influenced by sex, menstrual cycle, and sex steroid hormones. *Neuropsychologia*, 45, 3203–3214.
- Seurinck, R., Vingerhoets, G., de Lange, F. R., & Achten, E. (2004). Does egocentric mental rotation elicit sex differences? *Neuroimage*, 23, 1440–1449.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701–703.
- Sherwin, B. B. (2003). Estrogen and cognitive functioning in women. *Endocrine Reviews*, 24, 133–151.
- Signorella, M. L., Jamison, W., & Hansen Krupa, M. (1989). Predicting spatial performance from gender stereotyping in activity preferences and in self-concept. *Developmental Psychology*, 25, 89–95.
- Thomsen, T., Hugdahl, K., Ersland, L., Barndon, R., Lundervold, A., Smievoll, A. I., et al. (2000). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) study of sex differences in a mental rotation task. *Medical Science Monitor*, 6, 1186–1196.
- Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117, 250–270.
- 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.
- Williams, C. L., & Meck, W. H. (1991). The organizational effects of gonadal steroids on sexually dimorphic spatial ability. *Psychoneuroendocrinology*, 16, 155–176.

Preschoolers' mental rotation of letters: Sex differences in hemispheric asymmetry

Nicola Hahn

University of Regensburg, Regensburg, and Heinrich-Heine University, Düsseldorf, Germany

Petra Jansen

University of Regensburg, Regensburg, Germany

Martin Heil

Heinrich-Heine University, Düsseldorf, Germany

Adults' mental rotation performance has been found to produce one of the largest sex differences in cognition accompanied by sex differences in functional cerebral asymmetry. In this study sex differences in mental rotation of letters were investigated with children as young as five years. Based on the electrophysiological brain correlates of mental rotation, we observed a bilateral brain activity for preschool girls whereas the preschool boys' brain activity was clearly lateralized towards the right hemisphere if and only if mental rotation was needed to solve the task. At the same time, we did not find any sex differences in mental rotation speed or accuracy. Thus, sex differences in functional hemispheric asymmetry during mental rotation do not require hormonal changes that occur during puberty.

Keywords: Spatial cognition; Lateralization; Sex differences; Developmental cognitive neuroscience; Mental rotation; Event-related potentials.

INTRODUCTION

It is widely established that whereas females perform better on measures of verbal fluency, males outperform females on tasks requiring spatial abilities (Halpern, 1992). Meta-analytic studies have revealed that the magnitude of sex differences depends on the type of spatial task, where the male advantage is largest on mental rotation tasks (Linn & Petersen, 1985; Voyer, Voyer & Bryden, 1995), which demand the cognitive process of imagining an object turning around (Heil, Bajric, Rösler & Hennighausen, 1997; Shepard & Metzler, 1971).

In the past, psychosocial as well as biological–neuronal explanations were discussed as causes for the sex effect in mental rotation. Psychosocial theories stress the importance of sociocultural, environmental factors and the influence of attitudes and stereotypes (Steele, 1997), whereas the biological line of research considers brain organization and hormonal (organizational and activational) influences. Both approaches can quote empirical support, and they interact in several ways. Thus, a psycho-biosocial approach rests on complex reciprocity between biological, psychological, and social influences (Hausmann, 2007). Nevertheless, the influence of task attributes, such as

Correspondence should be addressed to: Martin Heil, Institute of Experimental Psychology, Heinrich-Heine-University Düsseldorf, 40225 Düsseldorf, Germany. E-mail: Martin.Heil@uni-duesseldorf.de

This study was supported by the German Research Foundation. We thank all primary school children and their teachers for participating in this study. We also gratefully acknowledge the helpful comments of J. P. Hamm, G. Knoblich, and an anonymous reviewer.

the type of stimuli, should also be taken into account. In this paper discussion will be restricted to sex differences in hemispheric lateralization.

Mental rotation seems to be a cognitive process implemented in the parietal cortex (e.g., Jordan, Heinze, Lutz, Kanowski, & Jäncke, 2001) that works in a continuous, analog way (e.g., Heil et al., 1997) and—as a spatial ability—is supposed to be fundamentally lateralized to the right hemisphere (for a review, see Corballis, 1997). Moreover, mental rotation is accompanied by sex-specific lateralization differences of cortical activity (e.g., Hugdahl, Thomsen, & Ersland, 2006). It is suggested that women show a more bilateral cortical activation during spatial tasks (e.g., Howard, Fenwick, Brown, & Norton, 1992; Kimura, 1992; McGlone, 1980). They seem to use left hemisphere processing to solve verbal as well as nonverbal tasks, whereas men are supposed to have more specialized hemispheric lateralization showing a clear right hemisphere asymmetry in spatial tasks (Howard et al., 1992). Studies examining the consequences of different brain lesions support these findings. McGlone (1980) investigated the occurrence of sex differences in the cerebral lateralization of verbal and nonverbal functions. In her studies only men showed specifically verbal deficits after left hemisphere damage and nonverbal deficits after right hemisphere damage. The cognitive deficits of the women tended to be less pronounced.

Furthermore, the continuous steroid fluctuations in normally cycling women lead to concomitant changes of gender differences both in performance (Hausmann, Slabbekoorn, Van Goozen, Cohen-Kettenis, & Güntürkün, 2000; Hausmann et al., 2006) and in the accompanying cerebral asymmetries (Hausmann, 2005; Schöning et al., 2007; but see Liben et al., 2002).

Developmental research suggested that sex differences in mental rotation in favor of males already can be observed in kindergarteners (Levine, Huttenlocher, Taylor, & Langrock, 1999) and probably even within the first 3 to 5 months of life (Moore & Johnson, 2008; Quinn & Liben, 2008). To date few data exist as to whether preschoolers' mental rotation performance is accompanied by sex differences in functional cerebral asymmetry. For this reason, in our previous study (Hahn, Jansen, & Heil, 2010) we analyzed mental rotation related amplitude effects of event-related potentials (ERPs) extracted from electroencephalography (EEG) in five-year-old children rotating animal drawings. We observed a sex difference in left hemisphere activation during mental rotation.

As mentioned above, the type of stimuli used during mental rotation influences performance as well

as sex differences (Jansen-Osmann & Heil, 2007b). A number of studies revealed an exceptional position of letter-specific processing (e.g., Jordan, Wüstenberg, Heinze, Peters & Jäncke, 2002). In our literate culture, reading is an important skill and letters are among a class of stimuli with which people have substantial experience (e.g., Burgund, Schlaggar, & Petersen, 2006). Probably that is why letters are frequently used as stimuli. Studies investigating adults' performance on tasks with letters and nonletters showed improved performance on the letter condition compared to the nonletter condition (e.g., van Leeuwen & Lachmann, 2004). Whether or not this material is suitable for preschoolers is questionable. However, studies with children as young as six revealed results comparable with those of adults (e.g., Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro, & Eden, 2003).

In the present study, blocks with upright vs. blocks with rotated pairs of letters were presented and the children had to decide whether the two presented letters were identical or mirror-reversed. Response times (RTs), accuracy and average ERP amplitudes were recorded. Hemispheric lateralization was determined by comparing the mental rotation related amplitude modulations over the left vs. the right electrode leads (F3, C3, and P3 vs. F4, C4, and P4).

METHOD

We recorded ERPs in two different types of trials: In upright trials, children had to decide whether two upright letters were identical or mirror-reversed. In rotated trials, the right letter additionally was rotated in the picture plane, and thus children had to rely on mental rotation to solve the task.

Participants

Participants were 88 preschoolers of five kindergartens in the area of Düsseldorf (age range: 58 to 75 months). Prior to testing, all parents gave their informed written consent for their children to take part in the EEG examination. The local ethics committee approved the experimental procedure. Data of eight children (7 girls, 1 boy) had to be excluded either because they did not complete the test (5), their error rate was below chance level (2) or because of fewer than 30 artifact-free trials per condition (1). The final sample comprised 40 girls (mean age: 66.9 months) and 40 boys (mean age: 66.4 months).

Materials

The experiment was run on a laptop PC with a 15-in monitor located approximately 50 cm in front of the children. The experimental stimuli consisted of the letters F, P, and R. In each trial two of the same letters were presented together. The left letter was always presented upright and in its normal version. The right letter was presented in identical or mirror-image version. In the rotated blocks, the right letter was rotated 150°, 180°, or 210°. Children responded “identical” by pressing the left mouse button and “mirror-reversed” by pressing the right mouse button.

Procedure

In order to test children in their familiar environment, ERP recordings took place in a quiet room of the kindergarten. Individual test sessions lasted about 50 min; the whole experiment, including electrode application and removal, lasted about 90 min. Every preschooler had to solve the mental rotation task while EEG was registered. Before the experiment started, the children practiced the required task with paperboard letters. First, two upright versions of the same letter were presented, where the right letter was identical or mirror-reversed. Children had to decide whether these letters were the same or not. Thereafter, one upright letter on the left and one rotated letter on the right were presented. That way the instruction was more obvious for the children since they had the opportunity to manually rotate the right letter to decide whether or not it was in its normal or mirror-image version. The experiment was started after children had understood the required task.

Each trial began with the presentation of a fixation point. One second later, a pair of letters was presented and remained visible until a button press response and were then replaced by a “+” or “−” for 500 ms, indicating the correctness of the response. Trials were separated by randomly varying intervals of 2–3 s. Children were told to respond as quickly and as accurately as possible. After a block of 6 trials children could take a break, which they terminated by pressing the space key. Altogether 210 experimental trials were presented in three blocks. The first and the third block consisted of upright stimuli, each with 42 trials (3 letters $\times$ 2 versions (normal or mirror-image) $\times$ 7 presentations) while the second one consisted of 126 trials with rotated stimuli (3 letters $\times$ 2 versions $\times$ 3 orientations (150°, 180°, 210°) $\times$ 7 presentations). Each block was preceded by practice trials to familiarize the children with the respective task.

EEG analysis

The EEG was recorded from nine Ag/AgCl electrodes placed at F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz and P4, based on the international 10–20 system. All electrodes were attached directly to the scalp. Digitally averaged earlobes served as reference. To control for eye movement artifacts, vertical and horizontal electrooculograms were recorded. The right mastoid served as ground. Impedance was kept below 10 k Ω . Digitization rate was 250 Hz and an online bandpass was set from DC to 100 Hz. A digital offline filter was set from 0.53 to 40 Hz. Continuous EEG was segmented into epochs of 1500 ms length starting 200 ms before stimulus presentation. The EEG was corrected for blinks and eye movements (Gratton, Coles, & Donchin, 1983). Automatic artifact rejection excluded epochs if voltage steps between two sampling points exceeded 80 μ V, if absolute amplitudes exceeded 175 μ V, if absolute voltage differences within a segment exceeded 225 μ V, or if activity was less than 5 μ V for a time epoch longer than 150 ms. From the edited set of raw data, we extracted ERPs by averaging single trials with correct responses separately for participants and upright vs. rotated trials. Based on previous studies (e.g., Heil & Jansen-Osmann, 2007), the mental rotation related amplitude effect was quantified as the mean voltage in the time window 600–800 ms after stimulus onset referenced to a prestimulus baseline of 200 ms.

RESULTS

Behavioral data

With accuracy as dependent variable, an ANOVA was calculated with the between-subjects factor “sex” and the within-subject factors “rotation” (upright vs. rotated trials) and “response” (same vs. different). We obtained a significant main effect of rotation, $F(1, 78) = 33.07, p < .01$, with higher accuracy for rotated than for upright stimuli (84.5% vs. 94.7%) but no main effect of sex, $F(1, 78) = 1.20, p = .28$ and also no interaction involving this factor. Type of response also had no effect and was also not involved in any interaction.

Only trials with correct responses were used for RT analysis. Before the analysis, RT data were trimmed for outliers. RTs more than 1.5 *SDs* above or below the mean per condition and per subject were excluded. An ANOVA calculated with the between-subjects factor “sex” and the within-subject factors “rotation” and “response” revealed a significant main

effect of rotation, $F(1, 78) = 169.15$, $p < .01$, with longer RTs for rotated than for upright stimuli (3995 ms vs. 2332 ms). We obtained neither a main effect of sex on RT, $F(1, 78) = 0.01$, $p = .91$, nor any interaction involving sex. RT did also not differ as a function of response, either for upright (2349 vs. 2316 ms for same vs. different responses) or for rotated trials (3986 vs. 4004 ms), but see Hamm, Johnson, and Corballis (2004).

Event-related potentials

With respect to brain imaging data, an ANOVA for upright trials with the between-subjects factor “sex” and the within-subjects factors “caudality” (frontal versus central versus parietal electrodes) and “laterality” (left versus right electrodes) revealed significant main effects of sex, $F(1, 78) = 4.41$, $p < .05$, caudality, $F(2, 156) = 47.75$, $p < .01$, and laterality, $F(1, 78) = 14.34$, $p < .01$ (Figures 1 and 2). No interactions were found.

A second ANOVA was calculated with the additional electrical brain activity observed when mental rotation was required. In addition to a significant main effect of sex, $F(1, 78) = 6.89$, $p < .05$, a significant two-way interaction of sex by laterality was obtained, $F(1, 78) = 5.67$, $p < .05$. Neither the interaction of sex by caudality, $F(2, 156) = 0.19$, $p = .76$,

nor the three-way interaction of sex by laterality by caudality reached significance, $F(2, 156) = 0.69$, $p = .50$. Whereas the brain activity of boys and girls did not differ over the right hemisphere, $F(1, 78) = 2.35$, $p = .13$, there was a significant difference over the left one, $F(1, 78) = 13.14$, $p < .01$. Boys’ brain activity was clearly larger over the right than over the left hemisphere, $F(1, 39) = 20.21$, $p < .01$, whereas girls revealed a bilateral pattern of brain activity, $F(1, 39) = 0.92$, $p = 0.34$ (Figure 3).

DISCUSSION

With respect to accuracy and speed, boys and girls showed no differences in performance. Letters are commonly understood as a kind of stimulus, where men and women do not show the usual sex effects during mental rotation (e.g., Jansen-Osmann & Heil, 2007b). Linn and Petersen (1985) suggest that women’s superiority in dealing with letter stimuli counteracts men’s superiority in mental rotation.

Concerning ERP data, the amplitude modulation as a function of mental rotation—consistently observed with adults (e.g., Bajric, Rösler, Heil, & Hennighausen, 1999), elementary school children (Heil & Jansen-Osmann, 2007) and recently also with preschoolers (Hahn et al., 2010)—was replicated in this study with children as young as 5 to 6 years. Wiers,

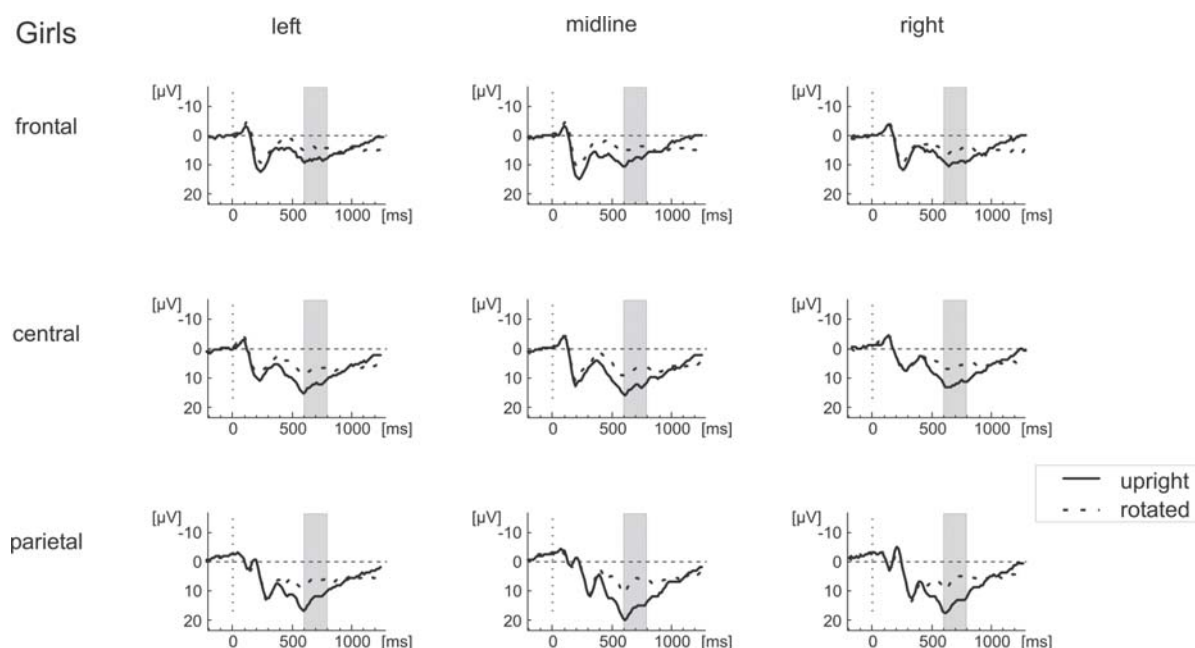


Figure 1. Girls’ ERPs as a function of orientation. Stimulus presentation was at $t = 0$ ms; negativity is up. The interval used as dependent variable is highlighted.

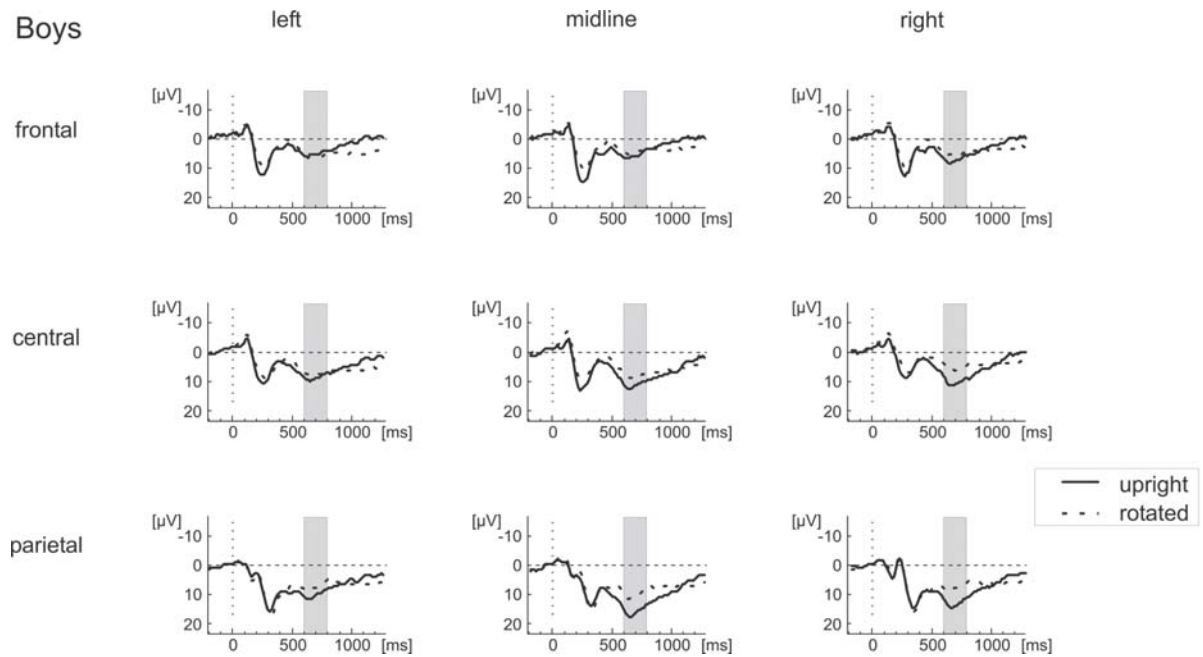


Figure 2. Boys' ERPs as a function of orientation. Stimulus presentation was at $t = 0$ ms; negativity is up. The interval used as dependent variable is highlighted.

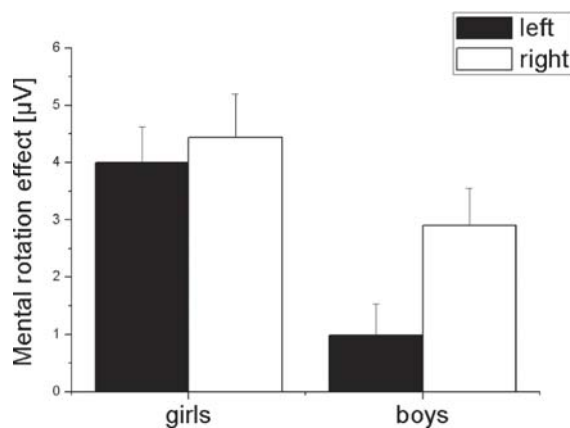


Figure 3. Sex-related hemispheric asymmetry during mental rotation. Mental rotation effects (difference in amplitude of upright vs. rotated trials) as a function of sex and hemisphere, averaged across frontal, central and parietal leads.

Otten, Feenstra, Mulder, and Mulder (1989) suggested that this effect is caused by a modulation of a slow negativity that should be taken as a direct physiological correlate of the mental rotation process itself (see Heil, 2002; Heil & Roelke, 2002). Negativity in the slow ERP usually is understood as an increase of neural activity in the underlying cortex (e.g., Rösler, Heil, & Röder, 1997).

Most importantly, a hemispheric lateralization during mental rotation as a function of sex was found.

Whereas the right hemisphere revealed no sex differences, there existed a clear difference in the left hemisphere activation if and only if mental rotation was used, thus replicating the results of Hahn et al. (2010) with different stimuli. Preschool girls showed a bilateral pattern of brain activity such that the mental rotation effect was observed at all electrodes. With respect to boys, the effect of mental rotation was clearly lateralized towards the right hemisphere. One has to keep in mind, however, that a blocked design was used with specific problems (see, e.g., Ilan & Miller, 1994; Jansen-Osmann & Heil, 2007a) and the results should be replicated using an unblocked presentation.

Our results are consistent with the suggestions from, e.g., Howard et al. (1992) that men compared to women have a more specialized right hemispheric lateralization, whereas women's lateralization is less pronounced in spatial tasks. Another explanation for the different lateralization is a different strategy used for mental rotation (Corballis, 1997). Corballis suggested that the right hemisphere might preferentially be used if the representation as a whole is rotated, whereas rotating a stimulus in a piecemeal fashion is more likely to involve the left hemisphere. Heil & Jansen-Osmann (2008) found in a mental rotation task with polygons of different complexity evidence that adult males generally tended to use more holistic strategies whereas females preferred analytic ones.

Since we did not find any sex differences in RT in the present study, there is no direct evidence for this assumption with preschoolers. Nevertheless, the clear right activation pattern for boys might suggest a holistic processing mode whereas the bilateral activation pattern of the girls might suggest a mixture of the two strategies. Furthermore, the results of this study are in line with the findings of our preceding work and illustrate that sex differences in brain activation—irrespective of activating hormonal effects that emerge in puberty—already exist in childhood. Whether these sex differences in functional hemispheric lateralization are attributable to the structural effects of early prenatal or postnatal sex hormones remains to be examined. Animal data demonstrate the relation between prenatal sex hormone level and spatial cognition (Williams & Meck, 1991) and in humans such a relation also seems to exist. This has been demonstrated in studies investigating the cognitive abilities of patients with congenital adrenal hyperplasia (Hines, Brook, & Conway, 2004). These patients exhibit a genetic malfunction, which is accompanied by an increased androgen secretion. In the case of girls this increase in prenatal testosterone level results in improved spatial performance, whereas an additional release in boys might result in diminished spatial performance (but see, e.g., Hines et al., 2003). Unfortunately, data regarding hemispheric lateralization during mental rotation in patients with congenital adrenal hyperplasia are missing.

In summary, the findings of the present study provide evidence for a sex-related hemispheric lateralization during mental rotation in children as young as five years. The causes of the sex effect, however, are still far from being understood. At present, we still do not even know whether or not neurobiological differences are causal with respect to sex differences.

Manuscript received 23 February 2010

Manuscript accepted 9 April 2010

First published online day Month year

REFERENCES

- 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.
- 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.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 57, 100–121.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 468–484.
- Hahn, N., Jansen, P., & Heil, M. (2010). Preschooler's mental rotation: Sex differences in hemispheric asymmetry. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 1244–1250.
- Halpern, D. F. (Ed.). (1992). *Sex differences in cognitive abilities* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 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.
- Hausmann, M. (2005). Hemispheric asymmetry in spatial attention across the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, 43, 1559–1567.
- Hausmann, M. (2007). Kognitive Geschlechtsunterschiede [Cognitive gender differences]. In S. Lauterbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Eds.), *Gehirn und Geschlecht [Brain and Sex]* (pp. 106–123). Berlin: Springer.
- Hausmann, M., Slabbekorn, D., Van Goozen, S. H., Cohen-Kettenis, P. T., & Güntürkün, O. (2000). Sex hormones affect spatial abilities during the menstrual cycle. *Behavioral Neuroscience*, 114, 1245–1250.
- Hausmann, M., Tegenthoff, M., Sängler, J., Jansen, F., Güntürkün, O., & Schwenkreis, P. (2006). Transcallosal inhibition across the menstrual cycle: A TMS study. *Clinical Neurophysiology*, 117, 26–32.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 681–692.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (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? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 683–689.
- Heil, M., & Rolk, B. (2002). Towards a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39, 414–422.
- Hines, M., Brook, C., & Conway, G. S. (2004). Androgen and psychosexual development: Core gender identity, sexual orientation, and recalled childhood gender role behavior in women and men with congenital adrenal hyperplasia (CAH). *Journal of Sex Research*, 41, 75–81.
- Hines, M., Fane, B. A., Pasterski, V. L., Matthews, G. A., Conway, G. S., & Brook, C. (2003). Spatial abilities following prenatal androgen abnormality: Targeting and mental rotations performance in individuals with congenital adrenal hyperplasia. *Psychoneuroendocrinology*, 28, 1010–1026.
- Howard, R., Fenwick, P., Brown, D., & Norton, R. (1992). Relationship between CNV asymmetries and individual differences in cognitive performance, personality and gender. *International Journal of Psychophysiology*, 13, 191–197.
- Hugdahl, K., Thomsen, T., & Ersland, L. (2006). Sex differences in visuo-spatial processing: An fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia*, 44, 1575–1583.

- Ilan, A. B., & Miller, J. (1994). A violation of pure in section: Mental rotation and choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 520–536.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007a). Maintaining readiness for mental rotation interferes with perceptual processes in children but with response selection in adults. *Acta Psychologica*, 126, 155–168.
- 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., & Jancke, 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., & Jancke, L. (2002). Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, 40, 2397–2408.
- Kimura, D. (1992). Sex differences in the brain. *Scientific American*, 267, 118–125.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A., & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, 35, 940–949.
- Liben, L. S., Susman, E. J., Finkelstein, J. W., Chinchilli, V. M., Kunselman, S., Schwab, J., et al. (2002). The effects of sex steroids on spatial performance: A review and an experimental clinical investigation. *Developmental Psychology*, 38, 236–253.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56, 1479–1498.
- McGlone, J. (1980). Sex differences in human brain asymmetry: A critical survey. *Behavioral and Brain Sciences*, 3, 215–227.
- Moore, D. S., & Johnson, S. P. (2008). Mental rotation in human infants: A sex difference. *Psychological Science*, 19, 1063–1066.
- Quinn, P. C., & Liben, L. S. (2008). A sex difference in mental rotation in young infants. *Psychological Science*, 19, 1067–1070.
- Rösler, F., Heil, M., & Röder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology*, 45, 109–141.
- Schöning, S., Engelien, A., Kugel, H., Schäfer, S., Schiffbauer, H., Zwitterlood, P., et al. (2007). Functional anatomy of visuo-spatial working memory during mental rotation is influenced by sex, menstrual cycle, and sex steroid hormones. *Neuropsychologia*, 45, 3203–3214.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701–703.
- Steele, C. (1997). A threat in the air – How stereotypes shape intellectual identity and performance. *American Psychologist*, 52, 613–629.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6, 767–773.
- van Leeuwen, C., & Lachmann, T. (2004). Negative and positive congruence effects in letters and shapes. *Perception and Psychophysics*, 66, 908–925.
- Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117, 250–270.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. (1989). Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, 26, 452–467.
- Williams, C. L., & Meck, W. H. (1991). The organizational effects of gonadal steroids on sexually dimorphic spatial ability. *Psychoneuroendocrinology*, 16, 155–176.

Erklärung

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

Düsseldorf, den

Nicola Hahn