



**Mentale Rotation von Polygonen:
Hemisphärenlateralisierung
und Geschlechtsunterschiede**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Julia Elisabeth Pellkofer

aus Kamp-Lintfort

Düsseldorf, Mai 2016

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

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

Referent: Prof. Dr. Martin Heil

Korreferent: Prof. Dr. Reinhard Pietrowsky

Tag der mündlichen Prüfung: 21.06.2016

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	6
1 Einleitung	8
1.1 Das Paradigma der mentalen Rotation	9
1.2 Befunde zur neuronalen Implementierung der mentalen Rotation.....	11
1.2.1 Hemisphärenlateralisierung des mentalen Rotationsprozesses	13
1.3 Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation	16
1.3.1 Geschlechtsunterschiede auf Verhaltensebene	16
1.3.2 Geschlechtsunterschiede auf neuronaler Ebene.....	18
1.4 Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede.....	21
1.4.1 Einfluss der verwendeten Rotationsstrategien.....	23
1.4.2 Einfluss des Stimulusmaterials	26
1.4.2.1 Polygone als spezielles Stimulusmaterial.....	28
1.5 Zentrale Fragestellungen	29
2 Experimente	31
2.1 Mentale Rotation von Polygonen: Lateralisierungseffekte der ereigniskorrelierten Potentiale	31
2.2 Einfluss des Geschlechts auf die Lateralisierung der ereigniskorrelierten Potentiale bei der mentalen Rotation von Polygonen.....	33
3 Diskussion	35
3.1 Ausblick.....	38
4 Literatur	42
5 Einzelarbeiten	54
5.1 Experiment 1.....	54
5.2 Experiment 2.....	54
6 Eidesstattliche Versicherung	66

Zusammenfassung

Nach Linn und Petersen (1985) zählt die mentale Rotation zu einer der Hauptkomponenten der räumlichen Wahrnehmung, für die regelmäßig ein robuster Geschlechtsunterschied auf behavioraler Ebene zugunsten der Männer nachgewiesen wird (z.B. Voyer, Voyer & Bryden, 1995). In den ersten Studien zur mentalen Rotation (Shepard & Metzler, 1971) konnte beobachtet werden, dass mit zunehmender Winkeldisparität zwischen zwei Stimuli auch die Reaktionszeit in einer "identisch vs. gespiegelt"-Entscheidungsaufgabe zunahm, was einen bis heute oft replizierten Befund darstellt. Ein Korrelat des mentalen Rotationsprozesses lässt sich auch auf neuronaler Ebene in Form einer spezifischen Amplitudenmodulation finden (Wjers, Otten, Feenstra, Mulder & Mulder, 1989), vor allem in parietalen Arealen.

In der Literatur werden diverse Erklärungsansätze für den Vorteil auf Verhaltensebene der Männer diskutiert, wobei sowohl psychosoziale, als auch hormonell-biologische und hirnmorphologische Aspekte als mögliche Erklärungen herangezogen werden. Neuere Ansätze gehen davon aus, dass die genannten Geschlechtsunterschiede multifaktoriell bedingt sind und möglicherweise auch durch die Strategien, die die Probanden bei der Lösung einer mentalen Rotationsaufgabe anwenden, beeinflusst werden. Demnach sollen sich Männer eher einer ganzheitlichen, holistischen Rotationsstrategie bedienen – einhergehend mit einer stärkeren Aktivierung der rechten Hemisphäre –, während Frauen die präsentierten Reize analytischer, also Stück für Stück, rotieren sollen – einhergehend mit einer stärkeren Aktivierung der linken Hemisphäre (z.B. Corballis, 1997; Cochran & Wheatley, 1989). Die Auswahl des Stimulusmaterials scheint jedoch grundlegend zu beeinflussen, ob Geschlechtseffekte überhaupt messbar werden. Jansen-Osmann und Heil (2007a) konnten lediglich für Polygone (Vielecke) einen signifikanten Geschlechtsunterschied in der Rotationsgeschwindigkeit feststellen. Polygone wurden in der Fachliteratur im Vergleich zu anderem Material bisher selten verwendet, obwohl diese einige Vorteile besitzen, z.B. dass sie wegen ihrer Unfamiliarität keine verbalen oder Gedächtnisprozesse zu aktivieren scheinen, die mit dem Prozess der mentalen Rotation interferieren könnten.

In den beiden Experimenten, die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, war von besonderem Interesse, welche Kortexareale bei der mentalen Rotation von zweidimensio-

nenalen Polygonen beteiligt sind, wobei die Elektroenzephalographie (EEG) als bildgebendes Verfahren verwendet wurde. Da die in der Literatur beschriebenen bildgebenden Studien zur mentalen Rotation oft niedrige Stichprobengrößen aufweisen, wurde in beiden Experimenten auf große Stichproben Wert gelegt, um eine ausreichende Teststärke zu gewährleisten. Im ersten Experiment konnte neben einem Effekt der Winkeldisparität in den Verhaltensdaten auf elektrophysiologischer Ebene eine Hemisphärenlateralisierung des mentalen Rotationseffekts zugunsten der linken Hemisphäre gefunden werden. Im zweiten Experiment wurden zusätzlich Geschlechtseffekte untersucht, welche sich sowohl in den Verhaltensdaten (Vorteil zugunsten der Männer), als auch in unterschiedlich ausgeprägten ereigniskorrelierten Potentialen zeigten. Während Männer ein eher bilaterales Aktivierungsmuster aufwiesen, war der mentale Rotationseffekt bei den weiblichen Probanden signifikant stärker linkshemisphärisch verankert.

Die Ergebnisse beider Experimente unterstützen zusammen die Annahme, dass nicht nur bei Verwendung von verbalem Stimulusmaterial, sondern auch bei Rotation von abstraktem Material die linke Hemisphäre mehr involviert zu sein scheint, was bedeutet, dass anscheinend mentale Rotation per se zu einer eher linkshemisphärischen Lateralisierung führt. Polygone scheinen in der Tat ein adäquates Stimulusmaterial darzustellen, um Geschlechtseffekte, auch auf neuronaler Ebene, zu evozieren (siehe auch Jansen-Osmann & Heil, 2007a). Die Befunde werden unter anderem auf Basis der Annahme, dass Männer und Frauen möglicherweise unterschiedliche Rotationsstrategien verwenden, diskutiert.

Abstract

Due to Linn and Petersen (1985) mental rotation is assumed to be one of the main abilities of spatial cognition. Usually men outperform women in mental rotation tasks on accuracy measures (e.g. Voyer, Voyer & Bryden, 1995). An often replicated finding is that a larger angular disparity between two stimuli goes along with longer reaction times in a parity judgement task (e.g. Shepard & Metzler, 1971), suggesting more mental rotation has to be done when the disparity is larger. The mental rotation effect can also be detected in a typical cortical activation pattern (Wijers, Otten, Feenstra, Mulder & Mulder, 1989), with strongest effects at parietal leads.

There is still some uncertainty about the reasons of the male advantage in mental rotation tasks. Both biological and social factors are discussed in literature as potential variables for sex differences in the mental rotation performance. Latest theories suggest that the differences depend on more than biological or social factors, e.g. that men prefer a holistic strategy of rotating, involving more the right hemisphere, while women tend to rotate in a piece by piece manner that should be involving the left hemisphere more than the right one (e.g. Corballis, 1997; Cochran & Wheatley, 1989). Moreover, there is some evidence that the kind of stimuli used could influence whether sex differences appear. Jansen-Osmann and Heil (2007a) obtained differences in the mental rotation speed for men and women only when polygons (i.e. random shapes) were used as stimuli. In comparison to other stimuli (e.g. alphanumeric characters) polygons have some advantages, e.g. that they are unfamiliar to the subjects and therefore do not evoke mnemonic or verbal processes that may interfere with the mental rotation process.

In the current work the electrophysiological correlate of mental rotation in a task with two-dimensional polygons as stimuli was investigated, using the electroencephalography (EEG) as a noninvasive imaging technique. More importantly, to achieve a high Teststärke we used sufficient sample sizes, in contrast to most of the brain imaging studies reported. In the first experiment, an effect of angular disparity on reaction times was found. Moreover, significant differences in the amplitude modulations of the event-related potentials were revealed for the hemispheres, implying the left hemisphere to be more involved in mental rotation of polygons than the right one. In addition to the results of the first experiment sex differences were investigated in a second experiment. Behav-

behavioral data revealed a male advantage. More interestingly, sex differences in the hemispheric lateralization were obtained: men showed a more bilateral activation pattern, while the mental rotation process was clearly lateralized to the left hemisphere for women.

In sum, the results of both experiments support the idea of a left hemispheric lateralization, not only when verbal stimuli have to be rotated, but with an unfamiliar stimulus type, too. Mental rotation per se seems to be more of a left hemispheric process. Polygons indeed seem to be a suitable stimulus type to obtain sex differences (Jansen-Osmann & Heil, 2007a), in behavioral data as well as in the event-related potentials. Discussion of the results is partly based on the theory that men and women might use different strategies to solve a mental rotation task.

1 Einleitung

Jeder Mensch ist in seinem Alltag ständig Teil einer räumlichen Umgebung, in der es sich zu orientieren gilt. So ist es z.B. notwendig, Objekte im Verhältnis zu sich selbst wahrzunehmen, Positionen einzuschätzen und die dreidimensionale Position im Raum auf eine zweidimensionale Perspektive zu übertragen, z.B. beim Interpretieren einer Landkarte. Es sind diverse Alltagsbeispiele denkbar, die alle gemeinsam haben, dass sowohl eine räumliche Analyse und ein Abgleich mit im Gedächtnis gespeicherten Vorstellungen zur Umgebung, als auch ein Abruf von potentiellen Bewegungsabläufen vollzogen werden muss, bevor eine angemessene Handlung erfolgen kann. Nach Linn und Petersen (1985) kann von drei Hauptprozessen der Raumkognition ausgegangen werden – der räumlichen Wahrnehmung (Spatial Perception), der räumlichen Veranschaulichung (Spatial Visualization) und der mentalen Rotation. Im Bereich der Intelligenztestdiagnostik nehmen die räumlichen Fähigkeiten in vielen Tests einen Teilbereich ein. Ein bekanntes Beispiel stellt der Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene (HAWIE) dar, die deutschsprachige Version des ursprünglich englischsprachigen Tests nach Wechsler (1955), in dem im so genannten Handlungsteil unter anderem vorgegebene Muster aus Würfeln nachgelegt werden sollen (Mosaiktest). Gut ausgeprägte räumliche Fähigkeiten scheinen sich jedoch nicht nur auf die Ergebnisse in Intelligenztests auszuwirken, sondern auch mit anderen kognitiven Fähigkeiten, z.B. mit guten mathematischen und naturwissenschaftlichen Leistungen zu korrelieren (Casey, Nuttall, Pezaris & Benbow, 1995; Ganley, Vasilyeva & Dulaney, 2014).

Mentale Rotation wird als Fähigkeit beschrieben, die mentale Repräsentation eines Objekts im Kopf zu drehen (Shepard & Metzler, 1971), um dann eine Entscheidung über den Reiz treffen zu können (in der Regel darüber, ob er gespiegelt ist oder nicht im Vergleich zu einem Referenzreiz). Annahmen bestehen darüber, dass die mentale Drehung einen kontinuierlichen Prozess darstellt und analog einer physikalischen Transformation eines realen Objektes erfolgt (Cooper & Podgorny, 1976; Cooper & Shepard, 1973; Cooper & Shepard, 1975; Heil, Bajric, Rösler & Hennighausen, 1997; Zacks, 2008).

Neben der Messung der mentalen Rotation mit Hilfe von Verhaltensdaten (Reaktionszeiten, Fehler), welche bereits seit über 40 Jahren in unterschiedlichen Paradigmen als abhängige Variable verwendet wurden, wurde in den letzten Jahren verstärkt mit bildge-

benden Verfahren gearbeitet, um den kognitiven Prozess, der bei der Lösung einer Aufgabe zur mentalen Rotation evoziert wird, genauer zu verstehen, sowohl hinsichtlich der funktionalen, als auch der zeitlichen Zusammenhänge. In der Literatur herrscht ein eher heterogenes Bild darüber, ob der Prozess der mentalen Rotation mit einer Hemisphärenlateralisierung einhergeht und ob es Geschlechtsunterschiede gibt. Ebenso wird darüber diskutiert, was die Erklärungen für bestehende (oder nicht bestehende) Lateralisierungen sein könnten, wobei eine Vielzahl von Einflussfaktoren in Frage zu kommen scheint.

Durch die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Experimente wurde eine Untersuchung der neuronalen Aktivität bei mentaler Rotation angestrebt, wobei auf Polygone als Stimuli zurückgegriffen wurde, welche bisher in der Literatur in mentalen Rotationsstudien nur selten erwähnt werden. Während im ersten Experiment zunächst die generelle kortikale Aktivierung untersucht werden sollte, lag im zweiten Experiment der Fokus auf den möglichen Unterschieden zwischen Männern und Frauen, sowohl auf Verhaltenesebene, als auch bezüglich ihrer Hirnaktivität bei mentaler Rotation von Polygonen. Zunächst wird eine Einführung in das Paradigma der mentalen Rotation und in den bisherigen Kenntnisstand zur kortikalen Implementierung des mentalen Rotationsprozesses gegeben. Es folgt ein Überblick über Geschlechtsunterschiede auf behavioraler Ebene, bevor die Befundlage zu Geschlechtsunterschieden auf neuronaler Ebene beschrieben wird. Ebenso werden einige Erklärungsansätze für diese Unterschiede beleuchtet, unter anderem der Einfluss der verwendeten Rotationsstrategien und des Stimulusmaterials. Dabei soll auf die Wechselwirkung beider Faktoren miteinander, als auch mit dem Faktor "Geschlecht" eingegangen werden.

1.1 Das Paradigma der mentalen Rotation

Das im Jahr 1971 von Shepard und Metzler vorgestellte chronometrische Experiment zur mentalen Rotation gilt in Fachkreisen wohl als das bekannteste. Mit Hilfe der von den Autoren beschriebenen Versuchsanordnung war es ihnen möglich, genaue Reaktionszeiten und Fehlerraten zu bestimmen, weshalb die Versuchsanordnung bis heute Verwendung findet (z.B. Quaiser-Pohl, Jansen, Lehmann & Kudielka, 2016). Als Stimuli wurden den Probanden dabei paarweise Würfelfiguren simultan auf einem Monitor prä-

sentiert, die je aus 10 kleinen Würfeln zusammengesetzt waren und je 4 „Arme“ besaßen (siehe Abbildung 1).

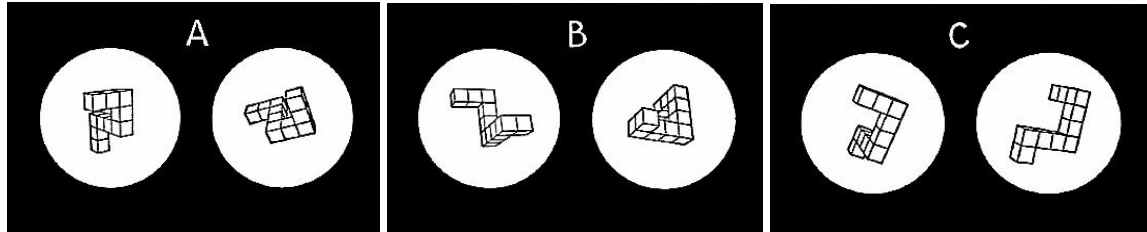


Abbildung 1. Beispiele für die von Shepard und Metzler verwendeten Würfelstrukturen (modifiziert nach Shepard und Metzler, 1971). A: Rotation in der Bildebene, Reize identisch; B: Rotation in der Bildtiefe, Reize identisch; C: Rotation in der Bildtiefe, Reize gespiegelt.

Der rechte Reiz konnte in der Bildebene (zweidimensional) oder in der Bildtiefe (dreidimensional) vom linken Reiz abweichen, wobei der Winkel zwischen den beiden präsentierten Reizen in 20°-Schritten variiert wurde. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, so akkurat und so schnell wie möglich zu entscheiden, ob es sich bei den beiden präsentierten Stimuli um identische Reize handelte – ob durch Rotation der eine also in den anderen Reiz überführbar war – oder ob der rechte Reiz die gespiegelte Version des linken darstellte. Shepard und Metzler (1971) stellten mit steigender Winkeldisparität zwischen den beiden präsentierten Figuren eine Zunahme der Reaktionszeit fest, die einem linearen Verlauf folgte. Die Autoren interpretierten diese Zunahme als Korrelat der mentalen Rotation auf Verhaltensebene – je größer die Winkeldisparität, desto mehr mussten die Probanden die präsentierten Reize mental rotieren, bevor sie eine Entscheidung bezüglich der Formgleichheit beider Reize treffen könnten. Die von Shepard und Metzler (1971) beschriebene Beobachtung, dass die Reaktionszeit der Probanden mit steigender Winkeldisparität zunahm – im Folgenden auch als mentaler Rotationseffekt (MRE) bezeichnet – gilt als stabil und wurde diverse Male repliziert (z.B. Desrocher, Smith & Taylor, 1995; Kosciak, O’Leary, Moser, Andreasen & Nopoulos, 2008), auch bei Verwendung von anderem Stimulusmaterial als Würfelstrukturen (z.B. Cooper & Shepard, 1973).

Neben chronometrischen Testverfahren wurden auch psychometrische Testverfahren, „Paper-Pencil-Tests“, entwickelt, wobei die erste Version eines solchen Testverfahrens unter Verwendung der von Shepard und Metzler (1971) vorgestellten Reize von

Vandenberg und Kuse im Jahr 1978 in Form eines psychometrischen mentalen Rotations-test stammte, welchem wiederum in einer überarbeiteten Version der so genannte „Mental-Rotations-Test (MRT)“ folgte (Peters, Laeng, Latham, Jackson, Zaiyouna & Richardson, 1995). Anders als bei einem chronometrischen Test wird beim MRT die Anzahl korrekt zugeordneter Items (zu einer Vergleichsfigur) innerhalb einer definierten Zeitspanne gemessen und mit Punkten bewertet. Bis heute finden beide genannten psychometrischen Testverfahren oft Anwendung (z.B. Kosciak et al., 2008; Parsons et al., 2004; Peters, 2005). Sowohl für psychometrische, als auch für chronometrische Tests gibt es Befunde, die dafür sprechen, dass die Probanden mit Übung besser wurden hinsichtlich ihrer mentalen Rotationsleistung (Kail & Park, 1990).

1.2 Befunde zur neuronalen Implementierung der mentalen Rotation

Um ein größeres Verständnis über die zugrundeliegenden Prozesse der mentalen Rotation zu erlangen, fand die Verwendung von bildgebenden Messmethoden - neben den klassischen Methoden auf Verhaltensebene - in Studien vermehrt Einzug, wodurch Rückschlüsse auf die bei der mentalen Rotation beteiligten Hirnareale möglich gemacht werden sollten. Dabei spielen z.B. die Positronen-Emissions-Tomographie (PET), die strukturelle Magnetresonanztomographie (sMRT), die funktionale Magnetresonanztomographie (fMRT) oder die Elektroenzephalographie (EEG) eine große Rolle.

Von zentraler Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist die EEG-Messung zu nennen, wobei, genauer gesagt, die Analyse der ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) wertvollen Aufschluss über den mentalen Rotationsprozess liefern kann. Bei mentaler Rotation wird in der Regel eine Amplitudenmodulation der EKP als Funktion der Winkeldisparität beobachtet (Wijers et al., 1989; Peronnet & Farah, 1989; Pierret, Peronnet & Thevenet, 1994; Desrocher et al., 1995). Die Amplitude im Zeitbereich nach der P300, eine späte Positivierung, scheint durch mentale Rotation dahingehend veränderbar, dass sie stärker negativ ausgeprägt ist, je stärker der präsentierte Reiz mental rotiert werden muss. Das Zeitfenster, in welchem die spezifische Veränderung der Amplituden bei mentaler Rotation sichtbar ist, ist dabei nicht eindeutig festgesetzt, erstreckt sich jedoch, wenn man die bisherigen Befunde zusammennimmt, in der Mehrheit der Fälle über mehrere hundert Millisekunden, im Zeitfenster zwischen etwa 300 bis etwa 1000 ms nach Stimuluspräsen-

tation (z.B. 300 - 700 ms bei Beste, Heil & Konrad, 2010; 400 - 700 ms bei Gootjes, Bruggeling, Magneé & Van Strien, 2008; 400 - 800 ms bei Peronnet & Farah, 1989) . Laut Wijers et al. (1989) scheint der Onset der spezifischen Amplitudenmodulation bei 350 - 400 ms nach Stimuluspräsentation zu liegen.

Einige Autoren postulierten, dass durch mentale Rotation eine Negativierung ausgelöst werde, welche die bestehende Positivierung abschwäche, so dass sich dies als Netto-Effekt in den EKP als eine weniger starke Positivierung widerspiegelt (Wijers et al., 1989; Rösler, Schumacher & Sojka, 1990), wobei von einem graduellen Prozess ausgegangen wird. Die beschriebene Amplitudenmodulation in Abhängigkeit von der Winkel-disparität konnte bis heute immer wieder repliziert werden und wird in Fachkreisen als Korrelat des MRE auf kortikaler Ebene verstanden (für einen Überblick siehe Heil, 2002). Dass die beobachtbare Amplitudenmodulation spezifisch beim Prozess der mentale Rotation und nicht in anderen Stufen der Reizverarbeitung auftritt, konnten z.B. Heil, Rauch und Hennighausen (1998) mit einer Aufgabe zur Buchstaben-/Zahlen-Erkennung zeigen. Wenn für das Lösen einer Aufgabe keine mentale Rotation notwendig ist, findet sich keine entsprechende Amplitudenmodulation (Heil, Bajric, Rösler & Hennighausen, 1996; Heil, 2002). Immer wieder wird diskutiert, ob die beobachtbare Amplitudenmodulation tatsächlich ein Korrelat des mentalen Rotationsprozesses darstellt oder ob in Wirklichkeit die Aufgabenschwierigkeit mit der mentalen Rotation interferiert und für das gefundene Amplitudenmuster verantwortlich ist. Bajric, Rösler, Heil und Hennighausen (1999) konnten mit ihrem experimentellen Aufbau erreichen, dass die Verarbeitung der Aufgabenschwierigkeit und die mentale Rotation entkoppelt und zeitlich hintereinander erfolgten, wodurch eine Konfundierung beider Variablen ausgeschlossen werden sollte. Ihre Ergebnisse sprachen dafür, dass nicht die Verarbeitung der Schwierigkeitsinformation der Aufgabe, sondern nur die mentale Rotation mit der in der Literatur immer wieder beschriebenen Negativierung der Amplitude einhergeht, was die Annahme, dass die Amplitudenmodulation bei mentaler Rotation spezifisch zu sein scheint, stützt.

Der kognitive Prozess der mentalen Rotation scheint im Gehirn vor allem in parietalen Regionen implementiert zu sein, was bedeutet, dass die spezifische Amplitudenmodulation dort am deutlichsten ausgeprägt ist (Peronnet & Farah, 1989; Wijers et al., 1989; Yoshino, Inoue & Suzuki, 2000; Hänggi, Buchmann, Mondadori, Henke, Jäncke, & Hock, 2008). Studien mit anderen bildgebenden Verfahren (fMRT: Jordan, Heinze, Lutz,

Kanowski & Jäncke, 2001; Kucian, Loenneker, Dietrich, Martin & von Aster, 2005 / PET: Alivisatos & Petrides, 1997; Harris, Egan, Sonkkila, Tochon-Danguy, Paxinos & Watson, 2000/ zerebrale Blutflussmessung: Deutsch, Bourbon, Papanicolaou & Eisenberg, 1988/ sMRT: Hänggi et al., 2008) unterstützen dabei die Befunde aus EKP-Studien hinsichtlich der Lokalisation des mentalen Rotationsprozesses in parietalen Regionen. Einige Studien beschreiben darüber hinaus eine Involvierung von weiteren kortikalen Arealen, welche mit der Objekterkennung, Kategorisierung, räumlichen Analyse, räumlichen Gedächtnisprozessen, räumlicher Aufmerksamkeit, Ausführung von Handlungen und Transformation von räumlich-visuellen Informationen in Verbindung gebracht werden. Dazu zählen z.B. zentrale Areale (Rösler, Heil, Bajric, Pauls & Hennighausen, 1995), der intraparietale Sulcus (Jordan et al., 2001), der mittlere frontale Gyrus und der prämotorische Cortex (Parsons et al., 1995; Cohen et al., 1996; Jordan et al., 2001), ebenso wie motorische Bereiche (z.B. Ganis, Keenan, Kosslyn & Pascual-Leone, 2000; Parsons et al., 1995; Jordan et al., 2001), welche laut Autoren bei der Enkodierung von motorischen Informationen, der Wahrnehmung und Verfolgung einer motorischen Bewegung ein Rolle spielen sollen. Ein neuronaler Zusammenhang zwischen Planung und Ausführung von Motorik und dem Prozess mentaler Rotation scheint zu bestehen (z.B. Zacks, 2008; Ganis et al., 2000). Habacha, Molinaro und Dosseville (2014) zeigten, dass Athleten, unabhängig von ihrer sportlichen Disziplin, besser in mentaler Rotation abschnitten als Nicht-Athleten, was dafür sprach, dass gut ausgeprägte reale motorische Fähigkeiten auch Einfluss auf kognitive Prozesse wie die mentale Rotation ausüben. Dass das Training von realen motorischen Fähigkeiten zu einer Verbesserung der mentalen Rotationsleistung führen kann, zeigten auch Jansen, Titze und Heil (2009) in ihrer Studie, bei der die Probanden jonglieren lernten, ebenso wie Jansen, Kellner und Rieder (2013) bei Kindern, die kreatives Tanzen als Training erhielten und bei dem Post-Training-Test in mentaler Rotation besser abschnitten.

1.2.1 Hemisphärenlateralisierung des mentalen Rotationsprozesses

Schon länger existieren Theorien, dass im menschlichen Gehirn eine funktionale Hemisphärenasymmetrie vorliegt, was bedeutet, dass verschiedene Funktionen des Gehirns entweder links- oder rechtshemisphärisch stärker implementiert sein sollen (Geschwind & Galaburda, 1987; Kosslyn, 1987; Voyer, 1996). Nach heutigem

Wissensstand wird weitgehend davon ausgegangen, dass sprachliche Funktionen eher linkshemisphärisch verankert sind, während die rechte Hemisphäre für nichtverbale, räumlich-visuelle Funktionen zuständig ist (Bryden, 1982; Geschwind & Galaburda, 1987). Nach Linn und Petersen (1985) wäre zu erwarten, dass die mentale Rotation als Teil der allgemeinen räumlichen Fähigkeiten eher in der rechten Hemisphäre verarbeitet werden müsste.

Diverse Paradigmen wurden entwickelt, um die mögliche Lateralisierung des MRE auf neuronaler Ebene zu untersuchen. Bereits bei Kindern kann eine Hemisphärenlateralisierung bei mentaler Rotation gezeigt werden (Heil & Jansen-Osmann, 2007). Wichtige Beobachtungen, die die Idee unterstützen, dass die Verarbeitung räumlicher Reize möglicherweise nicht gleichermaßen stark beide Hemisphären involviert, stammten aus Fallstudien mit Patienten, bei denen eine der beiden Hirnhälften durch Unfälle, Schlaganfälle, u.ä. Läsionen aufwies (Corballis & Sergent, 1988, 1989a, 1989b; Ditunno & Mann, 1990). In zwei Experimenten fanden Ditunno und Mann (1990) unter Verwendung der klassischen mentalen Rotationsaufgabe (Shepard & Metzler, 1971), wobei die Stimuli entweder im linken oder im rechten Gesichtsfeld präsentiert wurden, dass Patienten mit rechtshemisphärischen Läsionen deutliche Einbußen in ihrer mentalen Rotationsleistung im Vergleich zu Patienten mit linkshemisphärischen Läsionen aufwiesen. In der Kontrollgruppe (gesunde Probanden) konnte ein Vorteil von links präsentierten gegenüber rechts präsentierten Reizen gefunden werden, was die Läsionsstudienresultate stützte und die Autoren eine Implementierung der mentalen Rotation eher in der rechten Hemisphäre vermuten ließ. Diese Annahme, dass eine rechtshemisphärische Lateralisierung des mentalen Rotationsprozesses vorliegt, wird von weiteren Autoren unterstützt (Desrocher et al., 1995; Harris et al., 2000; Corballis, 1997; Corballis & Sergent, 1988; Ratcliff, 1979; Inoue, Yoshino, Suzuki, Ogasawara & Nomura, 1998; Yoshino et al., 2000). Deutsch et al. (1988) konnten diese Befunde mit Hilfe der Technik der zerebralen Blutflussmessung untermauern.

Fischer und Pellegrino (1988) hingegen fanden heraus, dass gesunde Probanden auf im rechten Gesichtsfeld präsentierte Reize, die mental rotiert und mit einem zentral dargebotenen aufrechten Reiz verglichen werden sollten, schneller reagierten, woraus sie schlossen, dass das Ansprechen der linken Hemisphäre durch Präsentation im rechten visuellen Halbfeld zu einem Verarbeitungsvorteil des mentalen Rotationsprozesses führt.

Von den Autoren wurde jedoch selber kritisch gesehen, dass in ihrer Studie nur Probanden getestet wurden, die bereits eine große Vorerfahrung mit mentalen Rotationsaufgaben hatten und so Trainingseffekte nicht ausgeschlossen werden konnten. Andere Studien legten allerdings ebenfalls eine stärkere Involvierung der linken Hemisphäre bei der Lösung von mentalen Rotationsaufgaben nahe (Ornstein, Johnstone, Herron & Swencionis, 1980; Mehta & Newcombe, 1991; Mehta, Newcombe & Damasio, 1987). Unter Verwendung des PET-Verfahrens fanden Kosslyn, DiGirolamo, Thompson und Alpert (1998) in ihrer Studie bei gesunden Probanden eine stärkere Aktivierung der linken parietalen Region, wenn Hände als Stimulusmaterial verwendet wurden. Ebenfalls mit Hilfe der PET-Methode konnten Alivisatos und Petrides (1997) eine verstärkte Aktivierung in der linken inferioren parietalen Region bei mentaler Rotation feststellen, bei Verwendung von Buchstaben als Stimuli. Für Würfelfiguren nach Shepard und Metzler (1971) wiesen Kosslyn et al. (1998) dagegen eine bilaterale Aktivierung nach. Ebenfalls keine Hemisphärenlateralisierung konnten Cohen und Polich (1989) finden, bei Verwendung eines visuellen Halbfelddesigns, mit Buchstaben und Polygonen als Stimuli, was die Autoren so deuteten, dass keine Hemisphäre vorrangig für mentale Rotation sensibel ist. Die fMRT-Studie mit Buchstaben und Zahlen als Stimuli von Milivojevic, Hamm und Corballis (2008) unterstützt die Hypothese, dass keine Hemisphäre bei mentaler Rotation dominanter als die andere ist, wobei die Autoren annahmen, dass zwar beide Hemisphären die Aufgabe der mentalen Rotation bewerkstelligen könnten, dass aber die rechte dabei schneller, also effizienter, zu arbeiten scheint.

Dass in den bis dahin beschriebenen Studien unter Umständen interindividuelle Differenzen zwischen den Probanden nicht berücksichtigt worden seien, kritisierten Voyer und Bryden (1990). Mit ihrer Studie, die auf dem von Fischer und Pellegrino (1988) beschriebenen Experiment beruhte, stellten Voyer und Bryden (1990) die These auf, dass die individuellen räumlichen Fähigkeiten einen Einfluss auf die Hemisphärenlateralisierung des MRE zu haben scheinen. So wurde gezeigt, dass bei Probanden mit gering ausgeprägten räumlichen Fähigkeiten eine hauptsächlich linkshemisphärische Aktivierung zu finden war, während bei Probanden mit mittleren räumlichen Fähigkeiten ein bilaterales Aktivierungsmuster gefunden wurde. Probanden mit hohen räumlichen Fähigkeiten zeigten hingegen eine rechtshemisphärische Lateralisierung des MRE. Auch Rösler, Heil und Röder (1997) konnten eine stärkere Negativierung der späten Amplitude in der Gruppe der "schlechtrotierenden" Probanden über der linken Hemisphäre finden, während diese

bei "gutrotierenden" Probanden nicht vorlag, was die Autoren so interpretierten, dass schlechte Probanden verstärkt auf Subsysteme der Verarbeitung von räumlichen Informationen zurückgreifen müssen, von welchen angenommen wird, dass diese linkshemisphärisch verankert sind. Voyer (1995) postulierte, dass nicht nur individuelle Effekte einen Einfluss auf die Lateralisierung haben, sondern dass auch die Übung der Probanden die Lateralisierung verändern kann.

1.3 Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation

Eine oft replizierte Annahme ist, dass Frauen in verbalen Aufgaben besser abschneiden als Männer, während diese den Frauen in räumlichen Aufgaben eher überlegen scheinen (Halpern, 1992). Die mentale Rotation zählt zu den kognitiven Komponenten, bezüglich derer immer wieder Geschlechtsunterschiede in der Performanz gefunden werden, die im Laufe der letzten Jahrzehnte robust zu sein und nicht abzunehmen scheinen (Masters & Sanders, 1993). Auch über verschiedene Kulturen und Ethnien hinweg (für einen Überblick siehe Levine, Foley, Lourenco, Ehrlich & Ratliff, 2016), ebenso wie über verschiedene Lebensspannen ist der Effekt stabil.

1.3.1 Geschlechtsunterschiede auf Verhaltensebene

Bereits im Lebensalter von unter einem Jahr (Moore & Johnson, 2008), als auch im späteren Kindesalter (z.B. Levine, Huttenlocher, Taylor & Langrock, 1999; Quinn & Liben, 2008) sind Jungen in mentalen Rotationsaufgaben gegenüber den Mädchen in der Regel überlegen, ein Effekt, der sich im Erwachsenenalter, bis hin ins hohe Erwachsenenalter, nachweisen lässt (Jansen & Heil, 2010). Die Größe der Geschlechtsunterschiede scheint mit zunehmendem Alter, von der Kindheit, über die Jugend bis hin ins Erwachsenenalter anzusteigen (Voyer et al., 1995), wobei es im höheren Erwachsenenalter wieder eine Annäherung der Geschlechter zu geben scheint, welche von Jansen und Heil (2010) als Bodeneffekt interpretiert wurde. Bis heute ist der Vorteil in mentalen Rotationsaufgaben zugunsten der Männer, vor allem auf der Ebene der Akkuratheit bei mentaler Rotation, nachweisbar und nimmt teilweise die Größe von etwa einer Standardabweichung ein (Linn & Petersen, 1985; Voyer et al., 1995).

Vor allem mit dem MRT (Vandenberg & Kuse, 1978) wurden oft deutliche Vorteile in den räumlichen Fähigkeiten von Männern gegenüber denen von Frauen gefunden (Voyer et al, 1995; Peters et al., 1995; Voyer & Saunders, 2004; Parsons et al., 2004). Nach Voyer (2011) ist das Ausmaß der Geschlechtseffekte in Paper-Pencil-Tests davon abhängig, ob ein Zeitkriterium gegeben wird oder nicht. Bereits im präpubertären Alter konnten Heil und Jansen-Omann (2008a) bezüglich der Akkuratheit einen Vorteil der Jungen gegenüber den Mädchen feststellen, während die Autoren hinsichtlich der Geschwindigkeit der mentalen Rotation keine Geschlechtsunterschiede fanden. Dieser Befund ist auch bei erwachsenen Probanden so des Öfteren nachweisbar. In computergestützten, chronometrischen Experimenten, in denen die Reaktionszeit als abhängige Variable erhoben wird, zeigen sich zwar auch regelmäßig Geschlechtsunterschiede in der Rotationsleistung zugunsten der Männer (Gootjes et al., 2008), gleichzeitig existieren im Vergleich zu den Paper-Pencil-Verfahren durchaus einige Gegenbeispiele, die keinen Vorteil der Männer gegenüber Frauen auf Verhaltensebene feststellen konnten (Desrocher et al., 1995; Jansen-Osmann & Heil, 2007a; Jones & Anuza, 1982; Hugdahl, Thomsen & Ersland, 2006). Die Datenlage hinsichtlich chronometrischer Tests scheint deutlich uneinheitlicher als bei Verwendung von Paper-Pencil-Tests wie dem MRT. Peters (2005) beschrieb, dass selbst mit einer vorselektierten Stichprobe, bei der im MRT ein Geschlechtseffekt zugunsten der Männer in Höhe von etwa 1.5 Standardabweichungen gefunden wurde, in einer chronometrischen mentalen Rotationsaufgabe mit Würfelfiguren in den Reaktionszeiten keine Geschlechtsunterschiede messbar waren.

Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation scheinen jedoch nicht unveränderbar. Bereits Peters et al. (1995) wiesen darauf hin, dass Frauen durch Übung im MRT schnell das gleiche Level wie Männer erreichen können. So konnten z.B. auch Habacha et al. (2014) mit einer vergleichsweise großen Stichprobe von 277 Probanden zeigen, dass Männer, wie oft berichtet, in einer mentalen Rotationsaufgabe zunächst besser als Frauen abschnitten. Nach einem Training zeigte sich, dass die Frauen in der Aufgabe besser abschnitten und auf das gleiche Niveau wie die Männer kamen. Auch das Trainieren der allgemeinen räumlichen Fähigkeiten mit Hilfe von Videospielen kann die Frauen im MRT auf ein ähnliches Level bringen wie Männer, selbst bei einer nur einstündigen Übungszeit (Cherney, Bersted & Smetter, 2014). Dabei scheint eine Involvierung des motorischen Systems von Vorteil (Jansen et al., 2009) und längeres Training zu mehr Verbes-

serungen der mentalen Rotationsfähigkeit zu führen (z.B. Baenninger & Newcombe, 1989).

1.3.2 Geschlechtsunterschiede auf neuronaler Ebene

Ob der Prozess der mentalen Rotation bei Männern und Frauen unterschiedlich neuronal implementiert ist, womit unter Umständen Erklärungen für die Befunde hinsichtlich Geschlechtsunterschieden auf Verhaltensebene gegeben werden könnten, wird schon länger mit Hilfe von bildgebenden Verfahren oder visuellen Halbfeld-Studien zu klären versucht. Dafür dass bereits im Kindesalter auf elektrophysiologischer Ebene Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation messbar sind, gibt es durchaus Belege (Jansen-Osmann & Heil, 2007b; Hahn, Jansen & Heil, 2010a, 2010b). Eine Hemisphärenlateralisierung des MRE war bei Kindern im Alter von etwa fünf Jahren nachweisbar, die dahingehend ausgeprägt war, dass Jungen ein klar rechtshemisphärisch lateralisiertes Aktivierungsmuster aufwiesen, während Mädchen eine bilaterale kortikale Aktivität zeigten, bei Verwendung von Buchstaben als Stimuli (Hahn et al., 2010a). Mit Tierzeichnungen als Stimuli konnten die Autoren in einer zweiten Studie ebenfalls bei etwa fünfjährigen Kindern beobachten, dass das kortikale Aktivierungsmuster der Jungen bilateral ausgeprägt war, sich bei den Mädchen aber eine linkshemisphärische Lateralisierung manifestierte (Hahn et al., 2010b).

Die Befundlage zu kortikalen Geschlechtsunterschieden scheint insgesamt sehr heterogen. In ihrer fMRT-Studie konnten Jordan, Wüstenberg, Heinze, Peters und Jäncke (2002) herausfinden, dass Frauen und Männer deutliche Unterschiede in ihren kortikalen Aktivierungsmustern bei mentaler Rotation von Würfelfiguren zeigten. Frauen wiesen eine signifikante bilaterale Aktivierung im intraparietalen Sulcus, dem superioren und inferioren Parietallappen, im inferioren temporalen Gyrus und in prämotorische Arealen auf, während für Männer eine Aktivierung im rechten parieto-okzipitalen Sulcus, im linken intraparietalen Sulcus und im linken superioren Parietallappen nachgewiesen wurde. Hugdahl et al. (2006) stellten in ihrer fMRT-Studie fest, dass Männer hauptsächlich parietal Aktivierung aufwiesen, bei Frauen zusätzlich dazu auch eine zusätzliche inferiore frontale Aktivierung vorlag. Interpretiert wurde dies von den Autoren in der Form, dass die Geschlechter unter Umständen unterschiedliche kortikale Netzwerke bemühen, um die mentale Rotationsaufgabe lösen zu können - Männer eher eine ganzheitliche Strategie,

Frauen eher eine serielle, unter Umständen auch mit verbalen Prozessen verknüpfte Strategie, wobei beide zu gleichen Performanzleveln zu führen scheinen.

Einige Studien legen nahe, dass Männer eher eine rechtshemisphärische Lateralisierung bei mentaler Rotation zeigen, während Frauen eher ein bilaterales Aktivierungsmuster aufweisen (Kimura, 1992; Howard, Fenwick, Brown & Norton, 1992). McGlone (1978) postulierte, dass das Gehirn von Männern grundsätzlich asymmetrischer organisiert zu sein scheint als das Gehirn von Frauen. Howard et al. (1992) schlussfolgerten aus ihren Daten, dass Männer die rechte Hemisphäre vermehrt bei der Lösung von räumlichen Aufgaben nutzen, während Frauen die linke Hemisphäre nicht nur bei der Lösung verbaler, sondern auch räumlicher Aufgaben bemühen, was zu keiner Asymmetrie der Aktivierungsmuster führt und auf eine stärkere Kommunikation der Hemisphären untereinander hindeuten kann. Ebenfalls eine rechtshemisphärische Lateralisierung bei Männern konnten Gootjes et al. (2008) und Yoshino et al. (2000) in ihren EKP-Studien finden. Zusätzlich zeigte sich bei Gootjes et al. (2008), dass bei Männern der Prozess der mentalen Rotation etwa 100 ms früher einzusetzen scheint als bei Frauen, was die Autoren als einen Teil der Erklärung von Geschlechtsunterschieden in den Reaktionszeiten interpretierten (siehe auch Jaušovec, 2012). Einige Studien wiesen bilaterale Aktivierungsmuster, also keine Hemisphärendominanz, bei den Geschlechtern nach (Jones & Anuza, 1982; Uecker & Obrzut, 1993; Parsons et al., 2004). Andere Studienergebnisse legen eine eher linkshemisphärische Involvierung bei mentaler Rotation für Männer nahe (Fischer & Pellegrino, 1988; Roberts & Bell, 2003), andere eine linkshemisphärische Dominanz für Frauen (van Strien & Bouma, 1990).

Dieser erste Überblick über die neurophysiologischen Befunde zeigt bereits, dass die Datenlage in Bezug auf neuronale Geschlechtsunterschiede (und mögliche Lateralisierungseffekte) bei mentaler Rotation, vor allem bei Verwendung von chronometrischen Testverfahren, alles andere als eindeutig ist. Ob Geschlechtsunterschiede auf Verhaltens-ebene oder zerebraler Ebene vorliegen, scheint von vielerlei Faktoren abhängig. Ein methodisches Problem in den meisten der genannten Studien zu Geschlechtsunterschieden stellt die Stichprobengröße dar, welche oft nicht groß genug gewählt wurde, um eine ausreichende Teststärke zu gewährleisten. Zwar konnten teilweise mittlere bis hohe Effektstärken (d nach Cohen, 1977) erzielt werden ($d = 0.2$ entspricht dabei einem kleinen Effekt, $d = 0.5$ einem mittleren Effekt, $d = 0.8$ einem großen Effekt), jedoch ist die Interpre-

tierbarkeit aufgrund der Stichprobengrößen kritisch zu sehen. Um theoretisch einen mittleren Effekt (also $d = 0.5$), zu erhalten, müsste man mindestens $N = 100$ Probanden testen, bei $\alpha = 0.05$ (einseitig), um eine Teststärke von 80% sicherzustellen (siehe auch 5.2 Experiment 2). Gerade für hochauflösende Methoden wie das fMRT ist die Erhebung von großen Stichproben aufgrund des Aufwands kaum denkbar, aber auch in EEG-Studien ist die Stichprobengröße selten sonderlich groß. Dies könnte das uneindeutige Bild, das in der Literatur zu finden ist, zumindest in Teilen erklären. In Tabelle 1 sind einige methodische Daten und Befunde aus bildgebenden Studien, die Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation untersucht haben, zusammengefasst.

Tabelle 1. Übersicht über einige bildgebende Studien zu Geschlechtseffekten bei mentaler Rotation.

Autoren	Verfahren	Stimulusmaterial	Stichprobe	Geschlechtseffekt auf Verhaltensebene	Geschlechtseffekt auf neuronaler Ebene
Desrocher et al. (1995)	EKP	Buchstaben, PMA	♀ = 10 ♂ = 10	keiner	♀ zeigen positivere Amplitudenausprägung im Bereich der P3 und N4 als ♂
Roberts & Bell (2003)	EKP	2D "Männchen"-Figuren	♀ = 16 ♂ = 16	keiner	♀ = mehr rh parietale Aktivierung ♂ = mehr lh parietale Aktivierung ($d = 1.8$)
Gootjes et al. (2008)	EKP	Buchstaben	♀ = 24 ♂ = 23	RT: ♂ schneller als ♀ ($d = 0.6$) Fehlerrate: kein Unterschied	bei 500-600 ms: ♂ rh Lateralisierung, ♀ nicht ($d = 0.8$)
Beste et al. (2010)	EKP	Buchstaben	♀ = 55 ♂ = 27	keiner	keiner
Jaušovec (2012)	EKP	"Paper Folding & Cutting"	♀ = 34 ♂ = 31	keiner	♀ zeigen kürzere Latenz der P1 ($d = 0.6$) und längere Latenz der P3 ($d = 0.6$) als ♂
Jordan et al. (2002)	fMRT	Würfel- figuren, Buchstaben, abstrakte Symbole	♀ = 14 ♂ = 10	keiner	Signifikante Unterschiede in 8 von 15 gemessenen Regionen. Vor allem Aktivität in folgenden Regionen: ♂: r. parieto-okzipitaler Sulcus, l. intraparietaler Sulcus, l. superiorer Parietallappen ♀: bilateral im intraparietalen Sulcus, superiorer und inferiorer Parietallappen, inferiorer temporaler Gyrus, prämotorische Areale
Kucian et al. (2005)	fMRT	Tierzeichnungen	♀ = 10 ♂ = 10	keiner	Größtenteils gleiche Aktivierungsmuster bei ♀ und ♂ (bilateral Okzipitallappen, inferiorer Parietallappen, frontale Bereiche); zusätzlich ♀ mehr Aktivität rh im mittleren temporalen Gyrus, im inferioren frontalen Gyrus und lh im primären Motorkortex
Butler et al. (2006)	fMRT	Würfel- figuren	♀ = 13 ♂ = 12	keiner	Größere Aktivität in folgenden Regionen: ♀: bilateral dorsomedialer präfrontaler Cortex, r. anteriorer Temporalpol und Regionen, die mit dem lateralen okzipitalen Cortex in Verbindung stehen ♂: bilateral postzentrale Gyri, l. parazentraler Lappen, l. Basalganglien, l. Prencueus
Hugdahl et al. (2006)	fMRT	Würfel- figuren	♀ = 5 ♂ = 6	keiner	♂ vor allem parietale Aktivität, ♀ zusätzlich inferiore frontale Aktivität
Koscik et al. (2008)	sMRT	Würfel- figuren (MRT)	♀ = 38 ♂ = 38	♂ mehr Items gelöst als ♀ ($d = 0.8$); ♂ mehr korrekte Antworten als ♀ ($d = 0.7$)	Im Parietallappen: ♂ weisen mehr Oberfläche als ♀ auf (gesamt (LH+RH): $d = 0.5$; nur LH: $d = 0.6$); ♀ weisen größeres Verhältnis von grauer zu weißer Substanz auf als ♂ (LH: $d = 0.5$; RH: $d = 0.5$)
Deutsch et al. (1988)	rCBF	Würfel- figuren	♀ = 9 ♂ = 10	♂ mehr korrekte Antworten als ♀ ($d = 1.2$)	nur andeutungsweise ein Unterschied in der Hemisphärenlateralisierung für ♂ und ♀

♀ = Frauen, ♂ = Männer, r. = rechts, l. = links, RH = rechte Hemisphäre, rh = rechtshemisphärisch, LH = linke Hemisphäre, lh = linkshemisphärisch, EKP = ereigniskorrelierte Potentiale, fMRT = funktionale Magnetresonanztomographie, sMRT = strukturelle Magnetresonanztomographie, rCBF = regionale zerebrale Blutflussmessung

Offensichtlich wird bei Zusammenfassung der Befunde weiterhin, dass nicht nur die Erhebung von geringen Stichprobengrößen für die Varianz der unterschiedlichen Befunde verantwortlich sein kann, sondern dass auch die Auswahl des Stimulusmaterials einen Einfluss haben könnte. In den beschriebenen Studien, die Geschlechtsunterschiede untersuchten, wurde eine breite Vielzahl an verschiedenen Stimuli verwendet. Dies erschwert Rückschlüsse darüber, ob die gefundenen (oder nicht gefundenen) Geschlechtsunterschiede tatsächlich auf Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit per se zurückzuführen sind oder ob diese durch die unterschiedliche Verarbeitung der Stimuli zu erklären sind. Eine Vertiefung der Thematik wird im nächsten Kapitel vorgenommen.

1.4 Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede

Was zu Geschlechtsunterschieden (oder auch zu einem Ausbleiben dieser) in der mentalen Rotationsleistung und auf neuronaler Ebene führt, ist nach wie vor noch unzureichend geklärt und wird in der Literatur aus verschiedenen Perspektiven und Fachrichtungen diskutiert. Einige Theorien versuchen Unterschiede aus psychosozialer Sicht zu erklären, wie z.B. damit, dass Geschlechtsstereotype Einfluss auf das Selbstbild und damit entsprechend auf die Fähigkeit, räumliche Leistungen zu erbringen, haben könnten (z.B. Signorella, Jamison & Krupa, 1989; Massa, Mayer & Bohon, 2005). Ein anderer Ansatz geht davon aus, dass die mentale Rotationsleistung davon positiv beeinflusst wird, wenn die Probanden in Kindheit und Jugend eher typisch maskuline räumliche Fähigkeiten ausgeübt haben, z.B. Modellbau oder Werken (Nazareth, Herrera, & Pruden, 2013). Auch ein Zusammenhang von "typisch männlichen" Hobbies, wie z.B. Videospiele, mit Geschlechtsunterschieden bei mentaler Rotation, wird vermutet, mit einem Vorteil der männlichen gegenüber den weiblichen Probanden (Terlecki & Newcombe, 2005).

Neben evolutionären Ansätzen (für einen Überblick siehe Joseph, 2000) werden verstärkt hormonell-biologische Ansätze zur Erklärung herangezogen. Hormonen werden sowohl so genannte organisierende, als auch aktivierende Effekte zugeschrieben (Güntürkün & Hausmann, 2003). Organisierend bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Hormone frühkindlich, teilweise auch pränatal, die Struktur des Gehirns und die Reifung mitbestimmen. Als aktivierend werden Effekte von Hormonen dann beschrieben, wenn sie später in der Entwicklung direkten Einfluss auf das Verhalten haben, ohne die Struktur

noch verändern zu können. Einige Autoren postulierten in diesem Zusammenhang, dass die mentale Rotationsleistung von Frauen abhängig von ihrer jeweiligen Zyklusphase ist (z.B. Hausmann, 2005), dass die interhemisphärische Integration je nach Zyklusphase bei Frauen unterschiedlich ausfällt (Bayer, Kessler, Güntürkün & Hausmann, 2008) und dass der im Speichel gemessene Testosteronspiegel mit der Leistung in räumlichen Aufgaben für Frauen und Männer unterschiedlich korreliert (Gouchie & Kimura, 1991). Aktuelle Studien weisen auf keinen Unterschied in den Testosteron- und Estradiolspiegeln bei präpubertären Probanden hin, trotz Unterschieden in der Performanz zugunsten der Jungen (Quaiser-Pohl et al., 2016). Auch wenn nicht eindeutig geklärt ist, ob und in welchem Ausmaß aktivierende oder organisierende Effekte von Hormonen als Erklärung für Geschlechtsunterschiede dienen können, ist klar, dass Unterschiede zwischen den Geschlechtern hinsichtlich ihrer mentalen Rotationsfähigkeit nicht erst im Erwachsenenalter zu finden sind, sondern bereits in der Kindheit (Hahn et al., 2010a, 2010b; Quaiser-Pohl et al., 2016). Von Interesse scheinen in diesem Zusammenhang weiterhin hirnmorphologische Erklärungsansätze zu sein, da Männer und Frauen nicht nur auf Verhaltensebene, sondern auch bezüglich ihrer zugrundeliegenden Hirnstrukturen Unterschiede aufzuweisen scheinen. Kosciak et al. (2008) konnten in ihrer MRT-Studie morphologische Unterschiede zwischen den Geschlechtern erkennen. Frauen wiesen im Vergleich zu Männern in parietalen Arealen ein proportional größeres Verhältnis an grauer zu weißer Substanz auf, während Männer generell eine größere Oberfläche in parietalen Regionen besaßen. Die Probanden sollten einen mentalen Rotationstest nach Vandenberg und Kuse (1978) durchführen, wobei der typische Befund repliziert wurde, dass Frauen hinsichtlich ihrer Leistung den Männern unterlegen waren. Kosciak et al. (2008) deuteten ihre Befunde als Hinweis darauf, dass die gefundenen hirnmorphologischen Unterschiede möglicherweise die auf Verhaltensebene gefundenen Geschlechtsunterschiede widerspiegeln (siehe auch Goldstein et al., 2001).

Neben den bisher genannten möglichen Einflussfaktoren, die zu Geschlechtseffekten führen könnten, wird in Fachkreisen diskutiert, ob nicht auch die Strategie, mit der ein Proband die Aufgabe löst, einen Einfluss auf den mentalen Rotationsprozess haben könnte, was wiederum Geschlechtsunterschiede mitbedingen könnte, genauso wie die Auswahl des verwendeten Stimulusmaterials. Im Folgenden sollen beide Aspekte und die möglichen Interaktionen näher beleuchtet werden.

1.4.1 Einfluss der verwendeten Rotationsstrategien

Auch wenn die Datenlage nicht eindeutig ist, wird mehrheitlich vermutet, dass sich Individuen, unterschiedlich an die Lösung von mentalen Rotationsaufgaben begeben, wobei das Geschlecht zumindest ein Indikator dafür sein könnte, welche Strategie gewählt wird (Kail, Carter & Pellegrino, 1979). Häufig finden sich in der Literatur Theorien, die eine Unterscheidung zwischen "analytischen" und "holistischen" Strategien vornehmen (Yuille & Steiger, 1982; Corballis, 1997; Just & Carpenter, 1985; Bradshaw & Nettleton, 1981). Unter dem Begriff "holistisch" wird in diesem Zusammenhang die ganzheitliche Verarbeitung eines Reizes verstanden (Cooper & Shepard, 1982; Folk & Luce, 1987), während "analytisch" in Zusammenhang mit Rotationsstrategien beschreibt, dass Probanden einen Reiz mental in Untersegmente unterteilen, welche dann einzeln rotiert werden (Kosslyn, 1981; Pylyshyn, 1979). Hypothesen bestehen darüber, dass die Aufgabenkomplexität Einfluss auf die Wahl der Strategie haben könnte. Einige Autoren konnten keinen Komplexitätseffekt finden (Cooper, 1975; Cooper & Podgorny, 1976; Bryden, George & Inch, 1990; Folk & Luce, 1987) - die Rotationsrate wurde nicht langsamer, wenn die Komplexität stieg, was wiederum für eine holistische Verarbeitung sprach. Andere, wie z.B. Just und Carpenter (1985), die die Fixation der Probanden beim Abgleich von präsentierten Würfelfiguren maßen, legten eher eine Stück-für-Stück-Rotation nahe, ebenso wie Yuille und Steiger (1982), die eine "nichtholistische" Strategie vermuteten, da sie bei steigender Komplexität der Stimuli eine Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit maßen.

Auf neuronaler Ebene wird aufgrund der Befundlage eine (nicht nur auf mentale Rotation bezogene) globale, holistische Verarbeitung eher mit der rechten, eine kleinschrittigere, analytische Verarbeitung dagegen eher mit der linken Hemisphäre in Zusammenhang gebracht (Corballis, 1997; Robertson & Delis, 1986; Ornstein et al., 1980). Welche Art der Verarbeitung gewählt und welche Hemisphäre eher aktiviert wird, scheint unter anderem vom Alter der Probanden abhängig. Jansen-Osmann und Heil (2007b) untersuchten Kinder und Erwachsene und konnten für alle Altersgruppen die für mentale Rotation spezifische Amplitudenmodulation an parietalen Elektroden finden, allerdings zeigten Kinder eine linkshemisphärische Lateralisierung, während bei Erwachsenen ein bilaterales Aktivierungsmuster zu finden war. Die Autoren vermuteten, dass mit

zunehmendem Alter, also mit zunehmender kognitiver Reifung und Erfahrung, ein Wechsel von analytischen zu eher holistischen Strategien stattfindet.

Ein Großteil der Studien, die in der Literatur zu finden sind, legt nahe, dass Männer eher auf holistische Strategien zurückgreifen, während Frauen eine Stück-für-Stück-Strategie verwenden (Desrocher et al., 1995; Heil & Jansen-Osmann, 2008b; Hugdahl et al., 2006; Olsen, Laeng, Kristiansen, Hartvigsen, 2013). Olsen et al. (2013) präsentierten die zu rotierenden Würfelfiguren einmal auf einem kleinen Display und einmal auf einer Großleinwand. Letzteres sollte die holistische Verarbeitung des Reizmaterials erschweren. Tatsächlich waren Frauen bei der Großleinwand-Bedingung deutlich schneller als Männer, was die Autoren zu dem Schluss brachte, dass die analytische Strategie, die Frauen nachgesagt wird, in der Großleinwand-Bedingung im Vergleich zu der typischerweise von Männern verwendeten holistischen Strategie vorteilig war.

Jordan et al. (2002) vermuteten aufgrund der Befunde aus ihrer fMRT-Studie, dass die unterschiedlichen Aktivierungsmuster für Männer und Frauen dafür sprechen könnten, dass sie unterschiedliche Strategien bemühen, um eine mentale Rotationsaufgabe lösen zu können. Dies führe laut Autoren demnach zu einer schlechteren Performanz der Frauen im Vergleich zu den Männern im MRT, da Frauen zusätzlich Netzwerke zu bemühen scheinen, die die Effizienz bei der Entscheidungsfindung mindern. Die kortikalen Unterschiede, die Semrud-Clikeman, Fine, Bledsoe und Zhu (2012) mittels fMRT zwischen Männern und Frauen finden konnten, interpretierten die Autoren unter anderem so, dass bei Männern eher ein automatischer Prozess bei der Verarbeitung von komplexen räumlichen Aufgaben stattfindet, während bei Frauen ein Top-Down-Prozess abläuft, eine Hypothese, die auch von den Ergebnissen der fMRT-Studie von Butler et al. (2006) unterstützt wird.

Weitere Erklärungen für Geschlechtsunterschiede finden sich z.B. bei Linn und Petersen (1985), die vermuteten, dass Frauen ihre Antworten doppelt absichern, also mehr als einmal die mentale Rotation vollziehen, und dass Frauen möglicherweise, falls sie eine analytische, Stück-für-Stück-Strategie verwendeten, mehr Teile einzeln rotieren, als eigentlich nötig wären, um die "identisch vs. gespiegelt"-Entscheidung treffen zu können. Voyer und Saunders (2004) vermuteten, dass Geschlechtsunterschiede dahingehend bestehen, dass Männer eher dazu neigen, bei der Lösung zu raten, während Frauen weniger bereit dazu sind. Es existieren weiterhin Annahmen, dass die Leistung in räumlichen

Tests zum Teil davon abhängt, wie flexibel zwischen verschiedenen Lösungsstrategien gewechselt werden kann (Cochran & Wheatley, 1989). Männer und Frauen scheinen sich anscheinend nur dann unterschiedlicher Lösungsstrategien zu bedienen, wenn die Aufgabe schwieriger war (Cochran & Wheatley, 1989), ein Befund, der durch die Ergebnisse von Collins und Kimura (1997) gestützt wird. Männer waren in ihrer Studie mit zweidimensionalem Stimulusmaterial signifikant von Vorteil, wenn die Aufgabe schwer war - bei ähnlich großen Effekten wie den typischerweise im MRT gefundenen. In der leichten Aufgabe waren keine Geschlechtsunterschiede zu finden. Dies zeigte sich auch in der Interpretation der EEG-Befunde von Roberts und Bell (2003), die bei zweidimensionalem Stimulusmaterial (laut Autoren simple Reize) eine rechtshemisphärische Dominanz bei Frauen und eine linkshemisphärische Dominanz bei Männern fanden, während bei dreidimensionalem Material (Würfel nach Shepard und Metzler (1971); laut Roberts und Bell (2003) komplexe Reize) kein Geschlechtseffekt zu finden war, aber ein Lateralisierungseffekt zugunsten der rechten Hemisphäre.

Heil und Jansen-Osmann (2008b) überprüften mit Polygonen unterschiedlicher Komplexität, ob Strategieunterschiede zwischen Männern und Frauen vorliegen könnten. Die Autoren nahmen an, dass sich bei holistischer Verarbeitung ein additiver Effekt ergeben müsste, dass also zwar die Reizverarbeitung, nicht aber die mentale Rotation als Prozess dadurch beeinflusst werden sollte, ob der Stimulus komplex oder simpel ist. Bei einer analytischen Verarbeitungsweise sollte sich laut Autoren ein überadditiver Effekt zeigen, was bedeutet, dass die mentale Rotationsgeschwindigkeit mit zunehmender Komplexität abnehmen sollte. Tatsächlich zeigten die Ergebnisse von Heil und Jansen-Osmann (2008b), dass die Komplexität der Polygone bei Männern keinen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit hatte, im Gegensatz zu den Frauen. Mit zunehmender Komplexität wiesen diese eine langsamere Rotationsgeschwindigkeit auf. Dies wurde von den Autoren als Hinweis gesehen, dass Männer eine eher ganzheitliche, holistische Rotationsstrategie verwendeten, während Frauen sich einer analytischen, Stück-für-Stück-Strategie bedienten, zumindest bei Verwendung von Polygonen. Hugdahl et al. (2006) vermuteten, dass unter Verwendung einer analytischen Vorgehensweise bei komplexen Stimuli die Enkodierung, Rotation und die Entscheidungsfindung hinsichtlich mehrerer Einzelsegmente des präsentierten Reizes vorgenommen wird.

Grundsätzlich scheint die Wahl der verwendeten Rotationsstrategie jedoch nicht unabänderbar. Annahmen bestehen, dass sich die Rotationsstrategien möglicherweise verändern, wenn die Probanden üben und somit vertrauter mit der mentalen Rotation werden (z.B. Hellige, 1976), was sich auf die Performanz auswirken kann. Hellige (1976) spricht dabei von einem "Shift", also von einer Verlagerung, wobei nicht klar definiert ist, wann dieser "Shift" tatsächlich stattfindet und ob sich dieser fließend oder abrupt gestaltet.

1.4.2 Einfluss des Stimulusmaterials

Welche Faktoren Einfluss darauf haben, welche Strategie verwendet wird und ob Probanden je nach Stimulusmaterial unter Umständen unterschiedliche Rotationsstrategien verwenden (Desrocher et al., 1995), ist bis jetzt noch unzureichend geklärt. Die Dimensionalität (zweidimensional versus dreidimensional) des Stimulusmaterials scheint zum einen keinen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit zu haben (Shepard & Metzler, 1988), zum anderen auch nicht auf die Größe des Geschlechtseffekts (Collins & Kimura, 1997). Deutlich ist jedoch, dass die Bandbreite der Stimulustypen, welche in der Literatur in Studien zur mentalen Rotation beschrieben wird, groß ist und unter anderem Würfelfiguren (Shepard & Metzler, 1971; Tomasino & Rumiati, 2004), Buchstaben (Kail et al., 1979; Desrocher et al., 1995; Núñez-Peña & Aznar-Casanova, 2009; Gootjes et al., 2008), PMA-Symbole nach Thurstone (1958) (Kail et al., 1979; Kail & Park, 1990), Hände (Ganis et al., 2000; Tomasino & Rumiati, 2004; Ter Horst, Jongma, Janssen, Van Lier & Steenbergen, 2012), Polygone (Cooper, 1975; Folk & Luce, 1987; Jansen-Osmann & Heil, 2007a) und Tierzeichnungen (Jansen-Osmann & Heil, 2007a; Hahn et al., 2010b) umfasst. Je nach Stimulusmaterial sind unterschiedliche Geschlechtseffekte berichtet worden, so dass es naheliegend scheint, den Einfluss der Stimulustypen genauer zu betrachten.

Insgesamt nehmen Buchstaben in den in der Literatur beschriebenen Studien als Stimuli den wohl größten Raum ein. Sie besitzen im Vergleich zu unbekanntem Reizen den Vorteil, dass nur ein Reiz präsentiert werden muss, um eine „identisch vs. gespiegelt“-Entscheidung treffen zu können (Heil, 2002; Jansen-Osmann & Heil, 2007a). Ein Abgleich mit einem Vergleichsreiz muss nicht stattfinden, da die Probanden wissen, wie ein Buchstabe oder eine Zahl in der Originalversion auszusehen hat. Gleichzeitig kann

genau dies nachteilig sein, da Buchstaben ein hochgradig überlerntes Stimulusmaterial darstellen, welches möglicherweise kognitive Prozesse evoziert, die mit dem mentalen Rotationsprozess interferieren. Dies zeigen mentale Rotationsstudien, in denen Buchstaben oder Zahlen mit abstrakten Symbolen als Stimuli verglichen wurden (Cooper & Shepard, 1982; Jordan et al., 2002; Kail, Pellegrino & Carter, 1980). Dabei ist vor allem von Gedächtnis- und Verbalisierungsprozessen auszugehen, die zusätzlich zum mentalen Rotationsprozess auftreten. Einige Autoren postulieren, dass gerade bei Verwendung von alphanumerischem Stimulusmaterial der Geschlechtsunterschied in der mentalen Rotationsleistung durch die Überlegenheit von Frauen im Umgang mit verbalen Reizen (z.B. Halpern, 1992) verkleinert (und unter Umständen deshalb nicht signifikant) wird, so dass die Frauen dadurch den Vorteil der Männer in mentaler Rotation ausgleichen können sollen (Kail et al., 1979; Linn & Petersen, 1985). Kail et al. (1979) präsentierten den Probanden buchstabenähnliche, aber unbekannte Reize, was laut Autoren genau diesen "Ausgleich" der Frauen verhindern sollte. Zusammenfassend scheint es bei mentaler Rotation von Buchstaben meist weder auf behavioraler (Jansen-Osmann & Heil, 2007a), noch auf elektrophysiologischer Ebene (Beste et al., 2010) Geschlechtsunterschiede zu geben.

Jansen-Osmann und Heil (2007a) stellten heraus, dass in der Regel die Stichprobengrößen in den meisten chronometrischen Studien zu Geschlechtseffekten bei mentaler Rotation eher mäßig ausgeprägt seien und es generell zu wenige Untersuchungen zum Einfluss des Stimulusmaterials auf Geschlechtseffekte gebe. Das Ziel der Autoren bestand entsprechend darin, bei großer Stichprobengröße ($N = 360$) zu überprüfen, inwieweit verschiedene Arten von Stimulustypen einen Einfluss auf Geschlechtsunterschiede in einer mentalen Rotationsaufgabe haben. Dabei verwendeten die Autoren fünf verschiedene Stimulustypen (Buchstaben, PMA Symbole, Tierzeichnungen, Polygone, Würfelfiguren) und ermittelten die Rotationsgeschwindigkeit (in $^{\circ}/s$) aus den Reaktionszeiten, wobei Geschlechtsunterschiede in der Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Stimulusmaterial für die Autoren von besonderem Interesse waren. Nur für Polygone konnten Jansen-Osmann und Heil (2007a) dabei in den Rotationsgeschwindigkeiten eine Interaktion zwischen dem Geschlecht und der Winkeldisparität finden. Männer waren dabei um 73% einer Standardabweichung (entspricht $d = 0.7$) schneller als Frauen.

1.4.2.1 Polygone als spezielles Stimulusmaterial

Weshalb Polygone als einziges Stimulusmaterial zu Geschlechtsunterschieden führten – weshalb sie also im Vergleich zu den anderen getesteten Stimuli eine Sonderstellung einzunehmen scheinen – war für Jansen-Osmann und Heil (2007a) nicht offensichtlich. Die Sonderstellung der Polygone konnte durch die Daten aber dahingehend gefestigt werden, dass nur bei Verwendung dieses Stimulustyps, sonst bei keinem Stimulusmaterial, Geschlechtsunterschiede im Hinblick auf den Rotations-Unsicherheits-Effekt gefunden wurden (siehe z.B. Ilan & Miller 1994; Heil & Jansen-Osmann, 2005). Anders als z.B. Collins und Kimura (1997) konnten Jansen-Osmann und Heil (2007a) keinen Einfluss der Komplexität der Stimuli auf den Umfang der Geschlechtsunterschiede finden. Cooper (1975) bemerkte ebenfalls bei Verwendung von Polygonen keinen Einfluss von einer veränderten Komplexität auf die Geschwindigkeit, mit der mental rotiert wurde. In einer weiterführenden Studie, die auf den Ergebnissen von Jansen-Osmann und Heil (2007a) beruhte, fanden Heil und Jansen-Osmann (2008b), wie bereits in Kapitel 1.4.1 beschrieben, dass bei Männern kein Einfluss der Komplexität auf die Rotationsgeschwindigkeit zu finden ist, bei Frauen jedoch eine Wechselwirkung vorzuliegen scheint (steigende Komplexität führt zu langsamerer Rotationsgeschwindigkeit).

Vorteile von Polygonen können darin gesehen werden, dass sie einfach zu generieren (z.B. nach der Methode von Attneave und Arnoult, 1956) und leicht, aber vor allem systematisch, in ihrer Komplexität zu verändern sind (Cooper, 1975; Heil & Jansen-Osmann, 2008b). Prinzipiell stellen Polygone im Vergleich zu alphanumerischen Stimuli ein für die Probanden gänzlich unbekanntes Stimulusmaterial dar. Dadurch sollte es im Vergleich zu alphanumerischem Material, zu keiner Interferenz des mentalen Rotationsprozesses kommen, weder durch mnestiche, noch durch verbale Prozesse, da Polygone a) keine Gedächtnisrepräsentation und b) keine verbalen Labels auslösen sollten. In Folge dessen sollten bei Verwendung von Polygonen andere Effekte verursacht werden als bei massiv überlernten Buchstaben (Van Leeuwen & Lachmann, 2004). Cohen und Polich (1989) fanden z.B. heraus, dass Probanden Buchstaben signifikant schneller identifizierten als Polygone. Im Hinblick auf eine zerebrale Lateralisierung fanden die Autoren jedoch keinerlei Unterschiede - für beide Stimulustypen schienen die kognitiven Prozesse bei mentaler Rotation in der linken und der rechten Hemisphäre gleichermaßen implementiert zu sein.

Pierret et al. (1994) berichteten in ihrer EKP-Studie mit Polygonen zwar keine Statistiken hinsichtlich einer Lateralisierung, allerdings ist eine Lateralisierung zur linken Hemishäre hin zumindest im Ansatz aus den dargestellten Abbildungen zu erkennen. Möglicherweise kam es aufgrund des Versuchsaufbaus in der genannten Studie (Stimuli wurden zeitlich hintereinander präsentiert, wodurch es vermutlich zu einer massiven Beanspruchung des räumlich-visuellen Arbeitsgedächtnisses kam) zu einer Verzerrung der EKP-Befunde. Bei einer erhöhten Belastung des räumlich-visuellen Arbeitsgedächtnisses, welche mit einer stärkeren rechtshemisphärischen Aktivierung einhergehen soll (Nagel, Herting, Maxwell, Bruno & Fair, 2013), kann es so zu einem Netto-Effekt kommen, der die eigentliche Linkslateralisierung durch mentale Rotation abgeschwächt darstellt.

Die wenigen Studien, in denen Polygone mental rotiert werden sollten (Cooper, 1975; Folk & Luce, 1987; Pierret et al., 1994; Jansen-Osmann & Heil, 2007a), konnten bisher erste Erkenntnisse zur mentalen Rotation unter Verwendung dieses Materials liefern, jedoch gibt es bisher nur ein rudimentäres, unzureichendes Bild darüber, welche (Geschlechts-) Effekte durch Polygone hervorgerufen werden können, sowohl auf behavioraler, als auch auf neuronaler Ebene. Gleichzeitig stellen Polygone aufgrund der Befunde von Jansen-Osmann und Heil (2007a) und Heil und Jansen-Osmann (2008b) ein hochinteressantes Stimulusmaterial zur Erforschung von Geschlechtseffekten bei mentaler Rotation dar.

1.5 Zentrale Fragestellungen

Um die bisherigen Erkenntnisse zur mentalen Rotation von Polygonen auszubauen, hatte das erste Experiment zum Ziel, den MRE auf behavioraler und elektrophysiologischer Ebene bei Verwendung von Polygonen bei einer vergleichbar großen Stichprobe zu untersuchen. Durch die Ergebnisse aus Experiment 1 sollte die bestehende Befundlage zur mentalen Rotation von unterschiedlichem Stimulusmaterial ergänzt werden. Sollte der aus vielen Studien bekannte MRE auf neuronaler Ebene auch bei der Verwendung von Polygonen zu finden sein, könnten die vorliegenden EKP-Befunde als weiteres Indiz dafür gesehen werden, dass die oft gefundene Amplitudenmodulation tatsächlich ein neuro-

physiologisches Korrelat der mentalen Rotation per se darstellt, und damit unabhängig vom verwendeten Stimulusmaterial ist.

Weiteres Ziel des ersten Experiments war es, zu überprüfen, ob auch bei Polygonen eine Lateralisierung des MRE zugunsten der linken Hemisphäre, wie bei Pierret et al. (1994) bei Verwendung von Polygonen angedeutet, vorliegt. Dies wiederum würde dafür sprechen, dass eine linkshemisphärische Lateralisierung nicht auf verbale Prozesse, sondern auf mentale Rotation per se zurückzuführen ist.

Nach Jansen-Osmann und Heil (2007a) stellen Polygone ein geeignetes Stimulusmaterial dar, um Geschlechtseffekte in der Rotationsgeschwindigkeit zu finden. Im zweiten Experiment wurde bei identischem Versuchsaufbau wie in Experiment 1 zusätzlich der Faktor "Geschlecht" berücksichtigt, um zu prüfen, ob sich auch auf elektrophysiologischer Ebene bei der Rotation von Polygonen Unterschiede zwischen Männern und Frauen finden lassen, bei deutlich größerer Stichprobe als in den meisten bildgebenden Studien zu Geschlechtseffekten bei mentaler Rotation. Heil und Jansen-Osmann (2008b) stellten unter Verwendung von Polygonen verschiedener Komplexität heraus, dass Männer anscheinend holistisch rotierten, während Frauen analytische Rotationsstrategien verwendeten. Sollte die Annahme stimmen, dass Männer und Frauen bei mentaler Rotation von Polygonen unterschiedliche Rotationsstrategien verwenden, sollte sich dies in den Verhaltensdaten als auch möglicherweise in einer unterschiedlichen Hemisphärenlateralisierung des MRE für die Geschlechter zeigen.

2 Experimente

Im Folgenden werden zwei Studien beschrieben, in denen die Amplitudenmodulation bei der mentalen Rotation von Polygonen untersucht wurde. In beiden Studien wurde ein EEG von jeweils 26 Elektrodenpositionen (F3, Fz, F4, FC5, FC1, FC2, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, TP9, CP5, CP1, CP2, CP6, TP10, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2) abgeleitet.

2.1 Mentale Rotation von Polygonen: Lateralisierungseffekte der ereigniskorrelierten Potentiale

In der Literatur sind nur wenige Studien zu finden, in denen Polygone als Stimulusmaterial in mentalen Rotationsaufgaben verwendet wurden, unabhängig davon, was genau das Untersuchungsziel der jeweiligen Studien war. Die Mehrheit der Studien, in denen EKP bei mentaler Rotation gemessen wurden, weist Buchstaben als Stimuli auf. Experiment 1 diente als Grundlagenexperiment, um die bei der Rotation von Polygonen auftretende Hirnaktivität und eine möglicherweise vorhandene Lateralisierung dieser Aktivität zu bestimmen, unabhängig vom Einfluss des Geschlechts der Probanden.

35 Probanden (18 weiblich, 17 männlich) im Alter zwischen 19 und 29 Jahren nahmen an jeweils einem Einzeltermin an dem EEG-Experiment zur mentalen Rotation teil. Als Stimuli dienten hierbei drei verschiedene Polygone, welche aus fünf oder sechs Ecken bestanden (siehe Abbildung 2). Diese fanden bereits in den Studien von Jansen-Osmann und Heil (2007a) und Heil und Jansen-Osmann (2008b) Anwendung und wurden laut Autoren als "simpel" eingestuft.

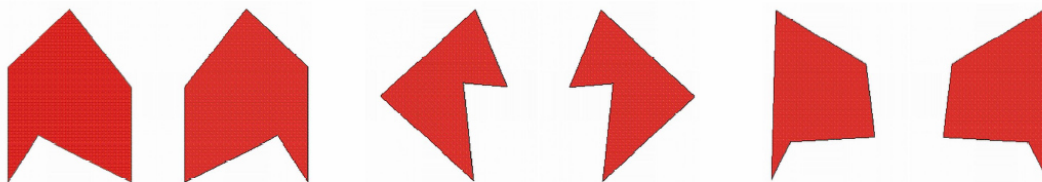


Abbildung 2. Die drei präsentierten Stimuli und ihre jeweiligen Spiegelversionen.

Pro Versuchsdurchgang (im Folgenden auch „Trial“) wurde jeweils eines der drei möglichen Polygone auf der linken Seite des Bildschirms präsentiert, während auf der rechten Seite das gleiche Polygon entweder in seiner ursprünglichen Form („identisch“) oder als Spiegelbild des linken Polygons („gespiegelt“) erschien. Das rechte Polygon konnte dabei um 30°, 90° oder 150° vom Ursprungszustand ausgehend mit dem oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht sein. Die Probanden sollten durch entsprechenden Tastendruck angeben, ob es sich bei dem rechten Polygon jeweils um die identische oder die gespiegelte Version des linken Polygons handelte. Nach 72 Übungstrials folgten 432 Experimentaltrials, aufgeteilt in 6 Blöcke á 72 Trials. Als abhängige Variablen wurden auf Verhaltensebene die Reaktionszeiten und die Fehlerraten gemessen. Auf elektrophysiologischer Ebene diente die gemittelte Amplitude im Zeitbereich von 500 bis 900 ms nach Stimuluspräsentation als abhängige Variable.

Wie auch in vielen anderen Studien beschrieben, konnte ein Effekt des Winkels auf Verhaltensebene gefunden werden. Mit zunehmender Abweichung des rechten Polygons vom linken stieg die Reaktionszeit signifikant an. Darüber hinaus reagierten die Probanden bei einer „identisch“-Reaktion signifikant schneller als bei einer „gespiegelt“-Reaktion. Auch in den Fehlerraten zeigte sich ein Effekt des Winkels. Je größer der Winkel zwischen den zwei präsentierten Polygonen war, desto mehr Fehler machten die Probanden.

Ein Haupteffekt des Winkels zeigte sich auch auf elektrophysiologischer Ebene. Der Vergleich der gemittelten Amplituden offenbarte, dass bei zunehmender Winkeldisparität zwischen den Polygonen eine signifikant zunehmende Negativität der Amplituden vorlag. Wie aus der Literatur bekannt, zeigte sich auch hier der Unterschied zwischen den Amplituden für die drei verschiedenen Winkel am stärksten ausgeprägt über zentroparietalen Kortexarealen (siehe Abbildung 3). Besonders stark war der Effekt an den Elektroden C3, CP1, P3, Pz und P4, mit signifikanten Unterschieden zwischen den Amplituden für alle drei Bedingungen. Mit Hilfe von Cluster-Analysen (linke Hemisphäre: CP5, CP1, P7, P3; rechte Hemisphäre: CP6, CP2, P8, P4) konnte herausgefunden werden, dass der Amplitudeneffekt in Abhängigkeit von der Winkeldisparität signifikant stärker linkshemisphärisch ausgeprägt war – dass also von einer deutlichen Lateralisierung des mentalen Rotationsprozesses unter Verwendung von Polygonen auszugehen ist.

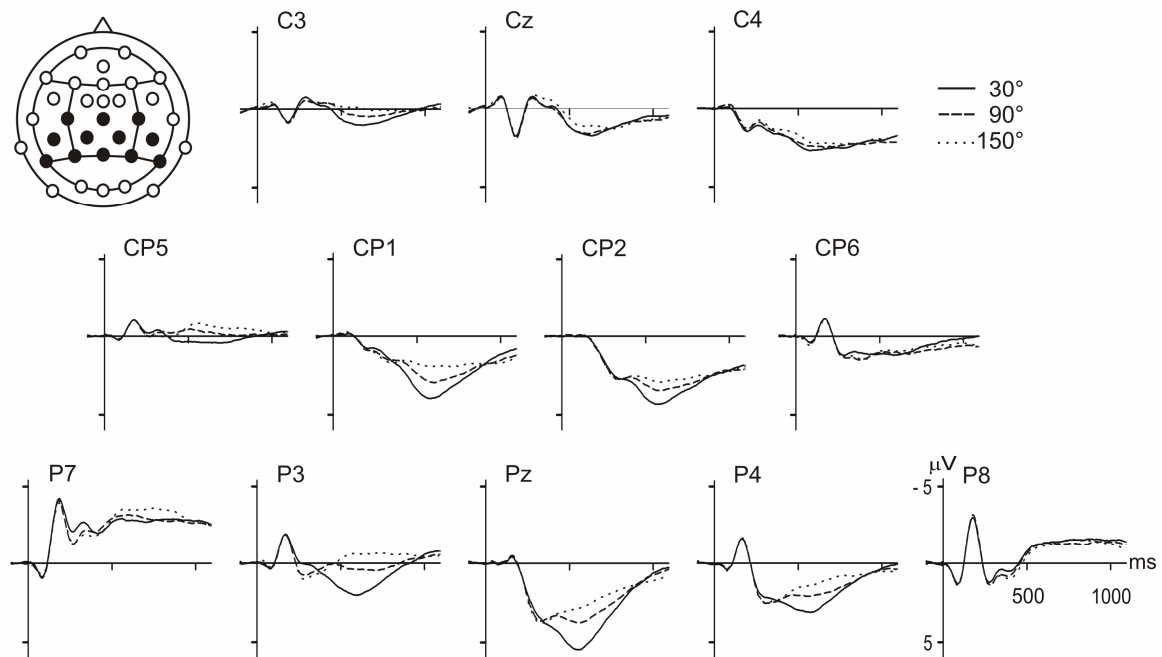


Abbildung 3. EKGs als Funktion der Winkeldisparität zwischen den präsentierten Reizen an den zentroparietalen Elektroden; CP5, CP1, P7, P3 (links) und CP6, CP2, P8, P4 (rechts) wurden als Elektroden in die Clusteranalyse einbezogen. Negativität ist nach oben abgetragen.

2.2 Einfluss des Geschlechts auf die Lateralisierung der ereigniskorrelierten Potentiale bei der mentalen Rotation von Polygonen

In Experiment 2 wurden zusätzlich Geschlechtsunterschiede in der Untersuchung der Hirnaktivität bei der Rotation von Polygonen berücksichtigt. Da Geschlechtseffekte untersucht werden sollten, wurde eine vergleichbar große Stichprobe von 122 Probanden im Alter zwischen 18 und 38 Jahren erhoben (62 Frauen, 60 Männer). Der Versuchsaufbau war identisch zu dem des ersten Experiments. Es wurden die gleichen Stimuli verwendet, welche ebenfalls paarweise und mit einer Winkeldisparität von entweder 30°, 90° oder 150° präsentiert wurden. Im Vergleich zum ersten Experiment wurde die Trialanzahl jedoch verdoppelt, was zu einer Gesamtzahl von 864 Trials (12 Blöcke á 72 Trials) führte. Jede Kombination von Polygon, Version (identisch vs. gespiegelt) und Winkeldisparität kam demnach 48 Mal vor. Wie in Experiment 1 dienten die Reaktionszeit, die Fehlerrate und die mittlere Amplitude im Zeitbereich von 500 bis 900 ms nach Stimuluspräsentation als abhängige Variable.

Auf Verhaltensebene konnten die Ergebnisse aus Experiment 1 repliziert werden. Ein Effekt des Winkels auf die Reaktionszeit konnte gefunden werden. Je stärker der rechte Reiz gedreht war, umso länger war die Reaktionszeit. Wie in Experiment 1 reagierten die Probanden bei einer „identisch“-Reaktion signifikant schneller als bei einer „gespiegelt“-Reaktion. Weiterhin konnte repliziert werden, dass die Probanden mehr Fehler machten, wenn der Winkel zwischen den zwei präsentierten Polygonen größer war.

Wie in vielen anderen Studien konnte eine Interaktion von Winkeldisparität und Geschlecht auf Verhaltensebene nachgewiesen werden. Männer reagierten signifikant schneller als Frauen, wobei bei größeren Winkeln der Unterschied zwischen Frauen und Männern größer war als bei kleineren. Die Berechnung der mentalen Rotationsgeschwindigkeit (siehe auch Jansen-Osmann & Heil, 2007a) aus der Reaktionszeit für jeden Probanden ergab, dass sich die Rotationsgeschwindigkeit für Frauen und Männer signifikant voneinander unterschied. Die Effektstärke für die Geschlechtsunterschiede hinsichtlich der Rotationsgeschwindigkeit betrug $d = 0.4$.

Auf elektrophysiologischer Ebene konnte der in der Literatur oft beschriebene Befund, dass der MRE über posterioren Elektroden stärker ausgeprägt ist als an anderen Elektroden, auch unter Verwendung von Polygonen gefunden werden. Mit Hilfe von Cluster-Analysen (linke Hemisphäre: CP5, CP1, P7, P3; rechte Hemisphäre: CP6, CP2, P8, P4) zeigte sich, dass der Amplitudeneffekt für die Geschlechter unterschiedlich lateralisiert ist. Für Frauen war der mittlere Amplitudeneffekt in Abhängigkeit von der Winkeldisparität größer über der linken als über der rechten Hemisphäre ausgeprägt, während Männer keine Hemisphärenlateralisierung aufwiesen. Zudem war der MRE über dem linkshemisphärischen Cluster für Frauen signifikant größer ausgeprägt als für Männer ($d = 0.5$), während dieser Unterschied rechtshemisphärisch nicht vorlag. Die detaillierte Abbildung der Amplitudenmodulation für Frauen und Männer sind Einzelarbeit 2 (Kapitel 5.2) zu entnehmen.

3 Diskussion

In beiden Studien, die dieser Arbeit zugrunde liegen, konnte auf Verhaltensebene der MRE auch bei Verwendung von Polygonen nachgewiesen werden. Die Probanden zeigten längere Reaktionszeiten, eine geringere Rotationsgeschwindigkeit und mehr Fehler bei höherer Winkeldisparität und reagierten schneller auf identische als auf gespiegelte Reize (Shepard & Metzler, 1971; Jansen-Osmann & Heil, 2007a). Hinsichtlich der Geschwindigkeit konnten die von Jansen-Osmann und Heil (2007a) gefundenen Ergebnisse in Bezug auf Polygone repliziert werden. Um eine ausreichende Teststärke zu gewährleisten, wurden die Experimente so geplant, dass in den beiden vorliegenden EEG-Studien die Stichproben höher ausfielen als in den meisten der in der Literatur zu findenden Studien.

Die Ergebnisse des ersten Experiments verdeutlichen zunächst, dass auch bei mentaler Rotation von Polygonen die Amplitudenmodulation im Bereich nach der P300 an posterioren Elektroden auftritt, ein Befund, der dafür spricht, dass die oft gefundene Amplitudenmodulation tatsächlich ein Korrelat des mentalen Rotationsprozesses darstellt, unabhängig von der Art des verwendeten Stimulusmaterials. Dass eine Hemisphärenlateralisierung des mentalen Rotationsprozesses aus den Daten ersichtlich wurde, ist durchaus eine wichtige Erkenntnis, da dies den Schluss zulässt, dass die Befunde aus Studien mit anderen Stimuli auch repliziert werden können, wenn Polygone verwendet werden. In Experiment 1 sollte es aufgrund des unbekanntes, nicht mit verbalen Labels versehenen Materials zu keiner Aktivierung von verbalen Gedächtnisinhalten oder Verbalisierungsprozessen gekommen sein. So sprechen die Befundmuster dafür, dass die linkshemisphärische Lateralisierung nicht durch verbale Prozesse (z.B. Geschwind & Galaburda, 1987), sondern durch den mentalen Rotationsprozess per se erklärbar ist. Natürlich ist dies nur eine Vermutung und es bedarf weiterer Untersuchungen mit räumlich hochauflösenden Verfahren wie dem fMRT, um zu überprüfen, ob Kortexaktivität, die z.B. auf Aktivität von verbalen oder mnestischen Netzwerken zurückzuführen sein soll, tatsächlich nicht zu finden ist, wenn Polygone rotiert werden sollen.

Im Vergleich zu Pierret et al. (1994) wurden beide Reize nicht zeitlich hintereinander, sondern parallel auf dem Bildschirm präsentiert, wodurch das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis nicht bemüht werden sollte. Dass es zu einer deutlich linkshemisphäri-

schen Ausprägung des mentalen Rotationseffekts kam, was sich bei Pierret et al. (1994) nur andeutungsweise ergab, spricht dafür, dass die gewählte Manipulation erfolgreich war und keine Aktivität des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses, welches stärker rechts-hemisphärisch gelagert sein soll, das durch mentale Rotation hervorgerufene kortikale Aktivierungsmuster überlagert hat.

Der MRE war auch im zweiten Experiment auf neuronaler Ebene unter Verwendung von Polygonen sichtbar, was die Daten des ersten Experiments repliziert und damit die Annahme nahe legt, dass die gefundene Amplitudenmodulation auf den mentalen Rotationsprozess zurückzuführen ist und als Korrelat dieses Prozesses auf neuronaler Ebene verstanden werden kann. Weiterhin sind deutliche Geschlechtsunterschiede erkennbar, was die Idee, dass Polygone gut geeignet sind, um Geschlechtsunterschiede zu evozieren (Jansen-Osmann & Heil, 2007a; Heil & Jansen-Osmann, 2008b), untermauert. Sowohl hinsichtlich der Fehlerraten und Reaktionszeiten, als auch im Hinblick auf die Rotationsgeschwindigkeit schneiden Männer besser als Frauen ab, ein Befund der bei Verwendung von anderem Stimulusmaterial häufig nicht zu finden ist (Jansen-Osmann & Heil, 2007a; Peters, 2005; Hugdahl et al., 2006). Weshalb ausgerechnet Polygone eine Sonderstellung unter den verschiedenen Stimulustypen einnehmen, wie bereits von Jansen-Osmann und Heil (2007a) vermutet wurde, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht klar. Deutlich ist bislang nur, wie die vorliegende Arbeit zeigt, **dass** durch sie, nicht nur auf behavioraler, sondern auch auf elektrophysiologischer Ebene, bei Frauen und Männern Unterschiede evoziert werden, die durch anderes Stimulusmaterial überwiegend nicht erzeugt werden konnten. Weitere Forschung ist notwendig, um die Sonderstellung von Polygonen näher zu begreifen.

Legt man die Annahmen zugrunde, dass Frauen tatsächlich zu einer eher analytischen Verarbeitung und Männer zu einer eher holistischen Verarbeitung neigen (Heil & Jansen-Osmann, 2008b) und dass die linke Hemisphäre eher dann aktiv ist, wenn analytisch verarbeitet werden muss, während die rechte Hemisphäre mehr involviert ist, wenn ein Reiz ganzheitlich rotiert wird (z.B. Corballis, 1997), dann könnten die vorliegenden Aktivierungsmuster, die im zweiten Experiment gefunden wurden, durchaus mit der Verwendung unterschiedlicher Rotationsstrategien interpretiert werden. Die deutlich linkshemisphärische Lateralisierung des mentalen Rotationsprozesses bei Frauen legt nahe, dass diese tatsächlich eher auf analytische Strategien zurückgreifen, sie die Polygo-

ne also Stück für Stück zu rotieren scheinen (Folk & Luce, 1987). Bei Männern scheinen die Ergebnisse nicht eindeutig auf die Verwendung nur einer der beiden Strategien zurückzuführen zu sein. Möglich ist, dass Männer Polygone zwar teilweise auch analytisch verarbeiten (was die Ergebnisse des ersten Experiments nahe legen), dass von Männern aber zusätzlich auch holistische Strategien verwendet werden, was die rechte Hemisphäre mehr aktiviert (z.B. Cochran & Wheatley, 1989), so dass als Netto-Effekt ein nicht lateralisiertes Aktivierungsmuster erkennbar ist. Ob und unter welchen Umständen holistische Strategien von Männern eingesetzt werden, ist nach wie vor unklar. Möglicherweise wechseln Männer flexibel zwischen den Rotationsstrategien (Cochran & Wheatley, 1989). Vorstellbar ist zumindest, dass durch die Verbindung von analytischen und holistischen Strategien bei Verarbeitung von Polygonen der Vorteil der Männer auf Verhaltens-ebene entstanden sein könnte, der sowohl in Experiment 2, als auch bei Jansen-Osmann und Heil (2007a) gefunden wurde.

Fraglich bleibt, worauf die unterschiedlichen Aktivierungsmuster für Männer und Frauen bei mentaler Rotation von Polygonen zurückzuführen sind. Dabei stellt sich zwangsläufig die Frage, ob die Wahl der Rotationsstrategie ursächlich für Unterschiede in der Hirnaktivität oder ob diese das Ergebnis von neuronalen Unterschieden ist. Geht man z.B. von der Annahme aus, dass Sexualdimorphismen (Geschlechtsunterschiede in der Morphologie des Gehirns) vorliegen, wären möglicherweise unterschiedlich ausgeprägte neuronale Netzwerke ursächlich dafür, dass Männer und Frauen unterschiedliche neuronale Verarbeitungspfade bei mentaler Rotation bemühen. Dies könnte infolgedessen zur Verwendung unterschiedlicher Strategien führen, was sich auch in den Reaktionszeiten, Fehlern und Rotationsgeschwindigkeiten niederschlägt. Dies würde zu den Ergebnissen des zweiten Experiments passen. Gleichzeitig gibt es Studien, in denen eindeutige zerebrale Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden gefunden wurden, obwohl sich in den Verhaltensdaten keine Unterschiede zeigten (z.B. Jordan et al., 2002; Kucian et al., 2005; Roberts & Bell, 2003). Eine einfache Interpretation, dass die Hirnmorphologie verantwortlich für Geschlechtseffekte ist, sollte also nicht getroffen werden. Ein multifaktorieller Interpretationsansatz erscheint angemessener, wobei hormonelle (organisierende und aktivierende), hirmorphologische, psychosoziale und individuelle Fähigkeiten berücksichtigt werden sollten. Voyer und Bryden (1990) postulierten hinsichtlich der Lateralisierung des mentalen Rotationsprozesses, dass die individuellen räumlichen Fähigkeiten dafür entscheidend sein können, ob eine Hemisphäre verstärkt

angesprochen wird oder ob beide gleichermaßen involviert sind (gering ausgeprägte räumliche Fähigkeiten: hauptsächlich linkshemisphärische Aktivierung; mittlere räumliche Fähigkeiten: bilaterales Aktivierungsmuster; hohe räumliche Fähigkeiten: hauptsächlich rechtshemisphärische Aktivierung). Wenn die Idee von Voyer und Bryden (1990) zuträfe, könnte es theoretisch ebenso sein, dass nicht das Geschlecht per se ausschlaggebend ist, sondern dass die in unseren Experimenten getesteten Frauen grundsätzlich geringer ausgeprägte räumliche Fähigkeiten besaßen, was zur linkshemisphärischen Lateralisierung führte, während die getesteten Männer im Schnitt eher über mittlere räumliche Fähigkeiten verfügten, einhergehend mit einem eher bilateralen Aktivierungsmuster - auch wenn dies in der Realität ein großer Zufall wäre, dass genau nur Frauen mit schlechten und nur Männer mit mittleren räumlichen getestet wurden. Möglicherweise könnte die Kombination des vorliegenden Versuchsaufbaus mit einem Test der allgemeinen räumlichen Fähigkeiten vermehrten Aufschluss darüber geben, ob a) die individuellen Fähigkeiten auch bei Verwendung von Polygonen ins Gewicht fallen, b) wie diese die kortikale Aktivierung bei mentaler Rotation von Polygonen beeinflussen und c) ob die gefundenen Geschlechtsunterschiede dadurch modifiziert werden, wenn die Interaktion mit den individuellen Fähigkeiten berücksichtigt würde.

Zusammenfassend kann aus dem ersten Experiment gefolgert werden, dass auch bei mentaler Rotation von Polygonen der MRE auf Verhaltensebene und in der Amplitudenmodulation vorliegt. Zudem scheint bei mentaler Rotation von Polygonen die linke Hemisphäre stärker involviert zu sein als die rechte. Aus den Befunden des zweiten Experiments kann ergänzend geschlossen werden, dass Polygone durchaus in der Lage zu sein scheinen, Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation zu erzeugen (Jansen-Osmann & Heil, 2007a), sowohl in den Verhaltensdaten, als auch auf elektrophysiologischer Ebene. Eine mögliche Erklärung kann in der Verwendung unterschiedlicher Rotationsstrategien von Frauen und Männern gesehen werden.

3.1 Ausblick

Um die Befundlage zur mentalen Rotation von Polygonen auszubauen, sollte ein grundlegendes Ziel zukünftiger Forschung vor allem darin bestehen, die hier vorliegenden Daten zu replizieren. Bereits bei der Planung zukünftiger Studien sollte ein Fokus auf

eine ausreichende Teststärke und die angestrebten Effektstärken gerichtet werden, durch die Einplanung großer Stichproben (mindestens $N = 100$ sollten bei ERP-Studien bei Geschlechtsvergleichen in Betracht gezogen werden). Weiterhin könnte die Kombination eines zeitlich hochauflösenden Verfahrens (z.B. EEG) mit einem räumlich hochauflösenden Verfahren (z.B. fMRT) durchaus sinnvoll sein, um die funktionalen Korrelate auf hirmorphologischer Ebene noch besser verstehen zu können. Dadurch könnte es auch möglich sein, die Hypothese, ob bei Rotation von Polygonen tatsächlich keine verbalen Netzwerke aktiviert werden, weiter zu überprüfen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen deutlich, dass Polygone, wie bereits von Jansen-Osmann und Heil (2007a) beschrieben, in der Lage sind, Geschlechtsunterschiede bei mentaler Rotation zu erzeugen, sowohl auf Verhaltensebene als auch in Form unterschiedlicher Lateralisierungen. Angenommen, Männer und Frauen verwendeten tatsächlich unterschiedliche Strategien bei der Lösung der Aufgabe (siehe Heil & Jansen-Osmann, 2008b), wäre es interessant, die Komplexität der Stimuli so zu verändern, dass eine holistische Bearbeitung deutlich erschwert würde. Geht man davon aus, dass Männer - anders als Frauen - in der aktuellen Studie sowohl analytische, als auch holistische Rotationsstrategien verwendet haben, könnte durch das starke Heraufsetzen der Komplexität provoziert werden, dass Männer ebenfalls nur analytisch vorgehen könnten (Olsen et al., 2013). Die Komplexität der bei Heil und Jansen-Osmann (2008b) verwendeten "komplexen" Polygone (mit 13 - 14 Ecken) reicht anscheinend noch nicht aus, um Männer zu einer rein analytischen Vorgehensweise zu bringen. Es scheint nötig, weitere kreative Ideen zu entwickeln, um dies zu evozieren. Es wäre gerade auf elektrophysiologischer Ebene interessant zu überprüfen, ob sich als Folge der Manipulation das Aktivierungsmuster der Männer verändert, möglicherweise hin zu einer ebenfalls stärkeren links-hemisphärischen Verarbeitung. Grundsätzlich bedarf es weiterer Forschung, um zu überprüfen, ob die Rotationsstrategien, die Männer und Frauen verwenden, als Erklärung für Unterschiede in der Performanz herangezogen werden können.

Unabhängig von einer Variation der Komplexität der Reize, sind weitere Experimente mit den hier verwendeten Polygonen durchaus denkbar. Wie aus Studien mit anderem Stimulusmaterial bekannt, ist der mentale Rotationseffekt durchaus durch Übung veränderbar. Fischer und Pellegrino (1988) z.B. hinterfragten ihre eigenen Befunde, da ihre Probanden gut vertraut mit mentalen Rotationsaufgaben waren; Peters et al. (1995)

konnten die Leistung ihrer Probanden durch Übung im MRT verbessern. In der Literatur finden sich auch Indizien dafür, dass Geschlechtsunterschiede in der mentalen Rotationsleistung verschwinden, wenn Frauen genug Übung darin erhalten. Hellige (1976) z.B. spricht von einer Verlagerung der Strategien, von "analytisch" hin zu "holistisch", wobei nicht klar definiert ist, wann diese Verlagerung tatsächlich stattfindet und ob diese fließend oder abrupt ist. Aber auch eine Veränderung der Hemisphärenlateralisierung von der rechten zur linken Hemisphäre mit zunehmendem Training wird teilweise vermutet (Goldberg & Costa, 1981; Voyer, 1995). In beiden Studien wurde die Verschiebung der Lateralisierung als Wechsel von einer holistischen zu einer analytischen Verarbeitung gedeutet, was erst mal paradox erscheinen mag. Der Begriff "analytisch" wird in diesem Zusammenhang von den Autoren so verstanden, dass Probanden gezielt kleinschrittig arbeiten und die Rotation mit der Zeit nur noch auf einen kleinen Teilbereich anwenden, was die Effizienz steigern soll. "Holistisch" kann in diesem Zusammenhang als eher unkoordinierte Vorgehensweise verstanden werden, bei der die Bandbreite an Möglichkeiten zur Rotation von den Probanden durchprobiert werden muss, bevor sie mit der zunehmenden Übung nicht mehr ausprobieren müssten, welche Strategie für sie die einfachste und effizienteste ist. Bezogen auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, wäre es interessant zu überprüfen, ob Trainingseffekte, in welcher Form auch immer, auch auftreten, wenn Polygone als Stimulusmaterial verwendet werden. Die Frage wäre, ob die Geschlechtsunterschiede, die bei Jansen-Osmann und Heil (2007a) bei Polygonen gefunden und die in der vorliegenden Arbeit repliziert wurden, so robust sind, dass auch Training nicht zu einer Abschwächung dieser Effekte führt. Sollte es, wie Hellige (1976) vermutet, der Fall sein, dass Probanden nicht mehr analytisch, sondern ganzheitlich rotieren, wäre interessant, ob sich diese Tatsache auch als elektrophysiologisches Korrelat abbilden ließe. Die stärkere linkshemisphärische Aktivierung bei Frauen könnte sich dann unter Umständen in ein bilaterales Aktivierungsmuster umstellen, wenn Frauen mit zunehmender Übung lernen, den Reiz als Ganzes zu rotieren. Bei Männern wäre dann möglicherweise eine Verlagerung zur rechten Hemisphäre hin zu beobachten. Prä-Post-Testungen mit Trainingsblöcken dazwischen könnten dementsprechend weiteren Aufschluss darüber geben, ob eine Verlagerung der Strategien auch mit Polygonen als Stimulusmaterial auftritt. Sollte es Übungseffekte geben, wäre es weiterhin interessant zu überprüfen, welche grundlegenden Mechanismen dafür verantwortlich sein könnten (Heil, Rösler, Link & Bajric, 1998).

Da in den Studien von Hahn et al. (2010a, 2010b) bereits im Kindesalter geschlechtsspezifische Hemisphärenlateralisierungen bei mentaler Rotation vorlagen, wäre durchaus von Interesse, ob Polygone, die bei Erwachsenen anscheinend zu starken Geschlechtseffekten führen, auch in der Lage wären, bereits bei Kindern Geschlechtseffekte hervorzurufen. Neben der Erforschung der mentalen Rotation mit Polygonen im Kindesalter wäre durchaus denkbar, auch Probanden im hohen Erwachsenenalter zu untersuchen. Jansen und Heil (2010) konnten bereits sowohl im MRT, als auch durch die Befunde hinsichtlich der Fehlerraten in ihrer computerbasierten Aufgabe unter Verwendung von Polygonen zeigen, dass Geschlechtsunterschiede bis hin ins hohe Erwachsenenalter (60-70 Jahre) zu finden sind (wobei die Effektstärken im MRT mit zunehmendem Alter geringer ausgeprägt waren). Interessant wäre, ob die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Hemisphärenlateralisierungen in Abhängigkeit vom Geschlecht auch im hohen Erwachsenenalter zu finden sind, wenn Polygone rotiert werden sollen. Entsprechend wäre die Frage, ob sich die Rotationsstrategien mit dem Alter unter Umständen ändern.

Wie erwähnt, scheint sich neben dem Faktors "Geschlecht" auch die generelle räumliche Fähigkeit in Lateralisierungseffekten niederzuschlagen (z.B. Voyer & Bryden, 1990). Für zukünftige bildgebende Studien mit Polygonen wäre denkbar, das Geschlecht zwar weiterhin als grundlegenden Faktor zu berücksichtigen, aber daneben ebenso die individuellen räumlichen Fähigkeiten, gemessen durch allgemeine räumliche Tests. Eine Unterscheidung in "begabte" vs. "nicht-begabte" Rotierer (z.B. Rösler et al., 1997), separat für jedes Geschlecht, könnte weiteren Aufschluss über die kortikale Implementierung des mentalen Rotationsprozesses, Geschlechtseffekte und Unterschiede in den Rotationsstrategien bei Verwendung von Polygonen geben.

Zuletzt soll zumindest am Rande erwähnt werden, dass die individuelle Motivation der Probanden natürlich ebenfalls Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Die Ergebnisse von Folk und Luce (1987) legen nahe, dass sich bei Aussicht auf Belohnung für korrekte Reaktionen die Probanden mehr bemühten, möglichst korrekt und schnell zu reagieren. In der vorliegenden Arbeit wurde mit einer einheitlichen finanziellen Entlohnung gearbeitet, unabhängig davon, wie schnell oder richtig die Probanden am Ende geantwortet haben. Grundlegend bleibt die Motivation, wie in anderen Studien auch, ein nur schwer zu kontrollierender Einflussfaktor.

4 Literatur

- Alivisatos, B., & Petrides, M. (1997). Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, *35* (2), 111-118.
- Ashton, R., & McFarland, K. (1991). A simple dual-task study of laterality, sex differences and handedness. *Cortex*, *27* (1), 105-109.
- Attneave, F., & Arnoult, M. D. (1956). The quantitative study of shape and pattern perception. *Psychological Bulletin*, *53* (6), 452-471.
- Baenninger M., & Newcombe N. (1989). The role of experience in spatial test performance: a meta-analysis. *Sex Roles*, *20* (5), 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* (3), 399-408.
- Bayer, U., Kessler, N., Güntürkün, O., & Hausmann, M. (2008). Interhemispheric interaction during the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, *46* (9), 2415-2422.
- Beste, C., Heil, M., & Konrad, C. (2010). Individual differences in ERPs during mental rotation of characters: Lateralization, and performance level. *Brain and Cognition*, *72* (2), 238-243.
- Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1981). The nature of hemispheric specialization in man. *Behavioral and Brain Sciences*, *4* (1), 51-63.
- Bryden, M. P. (1982). *Laterality: Functional asymmetry in the intact brain*. New York: Academic Press.
- 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* (2), 467-477.
- Butler, T., Imperato-McGinley, J., Pan, H., Voyer, D., Cordero, J., Zhu, Y. S., Stern, E., & Silbersweig, D. (2006). Sex differences in mental rotation: Top-down versus bottom-up processing. *NeuroImage*, *32* (1), 445-456.
- Casey, B. M., Nuttall, R., Pezaris, E., & Benbow, C. P. (1995). The influence of spatial ability on gender differences in mathematics college entrance test scores across diverse samples. *Developmental Psychology*, *31*, 697-705.

- Cherney, I. D., Bersted, K., Smetter, J. (2014). Training spatial skills in men and women. *Perceptual and Motor Skills, 119* (1), 82-99.
- Cochran, K. F., & Wheatley, G. H. (1989). Ability and sex-related differences in cognitive strategies on spatial tasks. *Journal of General Psychology, 116* (1), 43-55.
- Cohen, J. (1977). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, (revised ed.), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., Bookheimer, S. Y., Rosen, B. R., & Belliveau, J. W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation: A mapping study using functional MRI. *Brain, 119* (1), 89-100.
- Cohen, W., & Polich, J. (1989). No hemispheric differences for mental rotation of letters or polygons. *Bulletin of the Psychonomic Society, 27* (1), 25-28.
- Collins D. W., & Kimura, D. (1997). A large sex difference on a two-dimensional mental rotation task. *Behavioral Neuroscience, 111* (4), 845-849.
- Cooper, L. A. (1975). Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive Psychology, 7* (1), 20-43.
- Cooper, L. A., & Podgorny, P. (1976). Mental transformations and visual comparison processes: Effects of complexity and similarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2* (4), 503-514.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing*. Oxford, England: Academic.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1975). Mental transformations in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance, 104* (1), 48-56.
- 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. (1988). Recognition of Disoriented Shapes. *Psychological Review, 95* (1), 115-123.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language, 57* (1), 100-121.

- Corballis, M. C., & Sergent, J. (1988). Imagery in a commissurotomized patient. *Neuropsychologia*, 26 (1), 13–26.
- Corballis, M. C., & Sergent, J. (1989a). Hemispheric specialization for mental rotation. *Cortex*, 25 (1), 15-25.
- Corballis, M. C., & Sergent, J. (1989b). Mental rotation in a commissurotomized subject. *Neuropsychologia*, 27 (5), 585-597.
- 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 (1), 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, (3), 445-452.
- Ditunno, P. L., & Mann, V. A. (1990). Right hemisphere specialization for mental rotation in normals and brain damaged subjects. *Cortex*, 26 (2), 177-188.
- Fischer, S. C., & Pellegrino, J. W. (1988). Hemisphere differences for components of mental rotation. *Brain and Cognition*, 7 (1), 1-15.
- Folk, M. D., & Luce, R. D. (1987). Effects of stimulus complexity on mental rotation rate of polygons. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13 (3), 395-404.
- Ganis, G., Keenan, J. P., Kosslyn, S. M., & Pascual-Leone, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation. *Cerebral Cortex*, 10 (2), 175-180.
- Ganley, C. M., Vasilyeva, M., & Dulaney, A. (2014). Spatial ability mediates the gender difference in middle school students' science performance. *Child Development*, 85 (4), 1419-1432.
- Geschwind, N., & Galaburda, A. M. (1987). *Cerebral lateralization: Biological mechanism, associations, and pathology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Golberg, E., & Costa, L. D. (1981). Hemisphere differences in the acquisition and use of descriptive systems. *Brain and Language*, 14 (1), 144-173.
- Goldstein, D., Haldane, D., & Mitchell, C. (1990). Sex differences in visual-spatial ability: The role of performance factors. *Memory & Cognition*, 18 (5), 546-550.

- Goldstein, J.M., Seidman, L.J., Horton, N.J., Makris, N., Kennedy, D.N., Caviness, V.S. Jr., Faraone, S.V., Tsuang, M.T. (2001). Normal sexual dimorphism of the adult human brain assessed by in vivo magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, *11* (6), 490–497.
- Gootjes, L., Bruggeling, E. C., Magneé, T., & Van Strien, J. (2008). Sex differences in the latency of the late-event-related potential mental rotation effect. *NeuroReport*, *19* (3), 349-353.
- Gouchie, C., & Kimura, D. (1991). The relationship between testosterone levels and cognitive ability patterns. *Psychoneuroendocrinology*, *16* (4), 323-334.
- Güntürkün, O., & Hausmann, M. (2003). The dual coding hypothesis of human cerebral asymmetries. *Journal of Neurological Sciences*, *20* (3), 140-150.
- Habacha, H., Molinaro, C., & Dosseville, F. (2014). Effects of Gender, Imagery Ability, and Sports Practice on the Performance of a Mental Rotation Task. *The American Journal of Psychology*, *127* (3), 313-323.
- Hahn, N., Jansen, P., & Heil, M. (2010a). Preschoolers' mental rotation of letters: Sex differences in hemispheric asymmetry. *Cognitive Neuroscience*, *1* (4), 261-267.
- Hahn, N., Jansen, P., & Heil, M. (2010b). Preschoolers' mental rotation: Sex Differences in hemispheric asymmetry. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22* (6), 1244-1250.
- Halpern, D. F. (1992). *Sex differences in cognitive abilities*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hänggi, J., Buchmann, A., Mondadori, C. R., 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* (1), 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* (1), 65-73.
- Hausmann, M. (2005). Hemispheric asymmetry in spatial attention across the menstrual cycle. *Neuropsychologia*, *43* (11), 1559-1567.
- Heil, M. (2002). The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology*, *39* (5), 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* (4), 326-335.
- Heil, M., Bajric, J., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23* (3), 681-692.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (2005). A violation of pure insertion: Mental rotation and choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20*, 520-536.
- Heil, M., & Jansen-Osmann, P. (2007). Children's left parietal brain activation during mental rotation is reliable as well as specific. *Cognitive Development, 22* (2), 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* (5), 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* (2), 217-232.
- Heil, M., & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology, 39* (4), 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* (2), 99-106.
- Hellige, J. (1976). Changes in same-different laterality patterns as a function of practice and stimulus quality. *Perception and Psychophysics, 20* (4), 267-273.
- 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* (3), 191-197.

- Hugdahl, K., Thomsen, T., & Ersland, L. (2006). Sex differences in visuo-spatial processing: an fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia*, *44* (9), 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* (3), 520-536.
- Inoue, M., Yoshino, A., Suzuki, A., Ogasawara, T., & Nomura, S. (1998). Topographic study of human event-related potentials using a task requiring mental rotation. *Neuroscience letters*, *253* (2), 107-110.
- Jansen, P. & Heil, M. (2010). Gender differences in mental rotation across adulthood. *Experimental Aging Research*, *36* (1), 94-104.
- Jansen, P., Kellner, J., & Rieder, C. (2013). The improvement of mental rotation performance in second graders after creative dance training. *Creative Education*, *4* (6), 418-422.
- Jansen, P., Titze, C., & Heil, M. (2009). The influence of juggling on mental rotation performance. *Journal of International Sport Psychology*, *40* (2), 351-359.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007a). Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain and Cognition*, *64* (3), 217-227.
- Jansen-Osmann, P., & Heil, M. (2007b). Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *NeuroReport*, *18* (2), 175-178.
- Jaušovec, N. (2012). Sex differences in event-related potential components during the solution of complex mental rotation tasks. *NeuroReport*, *23* (6), 360-363.
- Johnson, B. W., McKenzie, K. J., & Hamm, J. P. (2002). Cerebral asymmetry for mental rotation: Effects of response hand, handedness and gender. *Neuroreport*, *13* (15), 1929-1932.
- Jolicoeur, P., Regehr, S., Smith, L. B. J. P., & Smith, G. N. (1985). Mental rotation of representations of two-dimensional and three-dimensional objects. *Canadian Journal of Psychology*, *39* (1), 100-129.
- Jones, B., & Anuza, T. (1982). Effects of sex, handedness, stimulus, and visual field on "mental rotation". *Cortex*, *18* (4), 501-514.

- Jordan, K., Heinze, H. J., Lutz, K., Kanowski, M., & Jäncke, L. (2001). Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *Neuroimage*, *13* (1), 143-152.
- Jordan, K., Wüstenberg, T., Heinze, H. J., Peters, M., & Jäncke, L. (2002). Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, *40* (13), 2397-2408.
- Joseph, R. (2000). The evolution of sex differences in language, sexuality, and visual-spatial skills. *Archives of Sexual Behaviour*, *29* (1), 35-66.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1985). Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability. *Psychological Review*, *92* (2), 137-172.
- Kail, R., Carter, P., & Pellegrino, J. (1979). The locus of sex differences in spatial ability. *Perception & Psychophysics*, *26* (3), 182-186.
- Kail, R., & Park, Y. S. (1990). Impact of practice on speed of mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *49* (2), 227-244.
- Kail, R., Pellegrino, J., & Carter, P. (1980). Developmental changes in mental rotation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *29* (1), 102-116.
- Kimura, D. (1992). Sex differences in the brain. *Scientific American*, *267* (3), 118-125.
- Koscik, T., O'Leary, D., Moser, D. J., Andreasen, N. C., & Nopoulos, P. (2008). Sex differences in parietal lobe morphology: Relationship to mental rotation performance. *Brain and Cognition*, *69* (3), 451-459.
- Kosslyn, S. M. (1981). The medium and the message in mental imagery: A theory. *Psychological Review*, *88* (1), 46-66.
- Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and imagining in the cerebral hemispheres: A computational approach. *Psychological Review*, *94* (2), 148-175.
- Kosslyn S. M., DiGirolamo G. J., Thompson W. L., & Alpert N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, *35* (2), 151-161.
- Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Martin, E., & von Aster, M. (2005). Gender differences in brain activation patterns during mental rotation and number related cognitive tasks. *Psychology Science*, *47* (1), 112-131.

- Levine, S. C., Foley, A., Lourenco, S., Ehrlich, S., & Ratliff, K. (2016). Sex differences in spatial cognition: advancing the conversation. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive science*, 7 (2), 127-155.
- Levine, S. C., Huttenlocher, J., Taylor, A., & Langrock, A. (1999). Early sex differences in spatial skill. *Developmental Psychology*, 35 (4), 940-949.
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: A meta-analysis. *Child Development*, 56 (6), 1479-1498.
- Massa, L. J., Mayer, R. E., & Bohon, L. M. (2005). Individual differences in gender role beliefs influence spatial ability test performance. *Learning and Individual Differences*, 15 (2), 99-111.
- Masters, M. S. (1998). The gender difference on the Mental Rotations Test is not due to performance factors. *Memory & Cognition*, 26 (3), 444-448.
- Masters, M. S., & Sanders, B. (1993). Is the gender difference in mental rotation disappearing?. *Behavior Genetics*, 23 (4), 337-341.
- McGlone, J. (1978). Sex differences in functional brain asymmetry. *Cortex*, 14 (1), 122-128.
- Mehta, Z., Newcombe, F., & Damasio, H. (1987). A left hemisphere contribution to visuospatial processing. *Cortex*, 23 (3), 447-462.
- Mehta, Z., & Newcombe, F. (1991). A role for the left hemisphere in spatial processing. *Cortex*, 27 (2), 153-167.
- Milivojevic, B., Hamm, J.P., & Corballis, M.C. (2008). Functional Neuroanatomy of Mental Rotation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21 (5), 945-959.
- Milivojevic, B., Hamm, J. P., Corballis, M. C. (2009). Hemispheric dominance for mental rotation: it is a matter of time. *NeuroReport*, 20 (17), 1507-1512.
- Monahan, J. S., Harke, M. A., & Shelley, J. R. (2008). Computerizing the mental rotations test: Are gender differences maintained? *Behavior Research Methods*, 40 (2), 422-427.
- Moore, D. S., & Johnson, S. P. (2008). Mental rotation in human infants: A sex difference. *Psychological Science*, 19 (11), 1063-1066.
- Nagel, B. J., Herting, M. M., Maxwell, E. C., Bruno, R., & Fair, D. (2013). Hemispheric lateralization of verbal and spatial working memory during adolescence. *Brain and cognition*, 82 (1), 58-68.

- Nazareth, A., Herrera, A., & Pruden, S. M. (2013). Explaining sex differences in mental rotation: role of spatial activity experience. *Cognitive Processing, 14* (2), 201-204.
- Núñez-Peña, M.I. & Aznar-Casanova, J.A. (2009). Mental rotation of mirrored letters: evidence from event-related brain potentials. *Brain Cognition, 69* (1), 180-187.
- Olsen, B. I., Laeng, B., Kristiansen, K.-A., Hartvigsen, G. (2013). Size does matter: Women mentally rotate large objects faster than men. *Scandinavian Journal of Psychology, 54* (3), 196-204.
- Ornstein, R., Johnstone, J., Herron, J., & Swencionis, C. (1980). Differential right hemisphere engagement in visuospatial tasks. *Neuropsychologia, 18* (1), 49-64.
- Parsons, L. M., Fox, P. T., Downs, J. H., Glass, T., Hirsch, T.B., Martin, C. C. , Jerabek, P. A., & Lancaster, J. L. (1995). Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature, 375* (6526), 54-58.
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., Rizzo, A.A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia, 42* (4), 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* (2), 279-288.
- Peters, M. (2005). Sex differences and the factor of time in solving Vandenberg and Kuse mental rotation problems. *Brain and cognition, 57* (2), 176-184.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. *Brain and cognition, 28* (1), 39-58.
- Pierret, A., Peronnet, F., & Thevenet, M. (1994). An electrophysiological study of the mental rotation of polygons. *NeuroReport, 5* (9), 1153-1156.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). The rate of "mental rotation" of images: A test of a holistic analogue hypothesis. *Memory & Cognition, 7* (1), 19-28.
- Quaiser-Pohl, C., Jansen, P., Lehmann, J, & Kudielka, B. M. (2016). Is there a relationship between the performance in a chronometric mental-rotations test and salivary testosterone and estradiol levels in children aged 9-14 years?. *Developmental Psychobiology, 58* (1), 120-128.
- 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* (1), 49-54.
- 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* (4), 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* (3), 235-246.
- Robertson, L. C., & Delis, D. C. (1986). `Part-whole`processing in unilateral braindamaged patients: Dysfunction of hierarchical organization. *Neuropsychologia, 24* (3), 363-370.
- Rösler, F., Heil, M., Bajric, J., Pauls, A. C., & Hennighausen, E. (1995). Patterns of cerebral activation while mental images are rotated and changed in size. *Psychophysiology, 32* (2), 135-149.
- Rösler, F., Heil, M., & Röder, B. (1997). Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biological Psychology, 45* (1-3), 109-141.
- Rösler, F., Schumacher, G., & Sojka, B. (1990). What the brain reveals when it thinks. Event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *The German Journal of Psychology, 14*, 185-203.
- Semrud-Clikeman, M., Fine, J. G., Bledsoe, J., & Zhu, D. C. (2012). Gender differences in brain activation on a mental rotation task. *Journal of Neuroscience, 122* (10), 590-597.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science, 171* (3972), 701-703.
- Shepard, S., & Metzler, D. (1988). Mental rotation: Effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 14* (1), 3-11.
- 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* (1), 89-95.

- Ter Horst, A. C., Jongasma, M. L. A., Janssen, L. K., Van Lier, R., & Steenbergen, B. (2012). Different mental rotation strategies reflected in the rotation related negativity. *Psychophysiology*, *49* (4), 566–573.
- Terlecki, M. S., & Newcombe, N.S. (2005). How important is the digital divide? The relation of computer and videogame usage to gender differences in mental rotation ability. *Sex Roles*, *53* (5-6), 433-441.
- Tomasino, B., & Rumiati, R.I. (2004). Effects of strategies on mental rotation and hemispheric lateralization: Neuropsychological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16* (5), 878-888.
- Uecker, A., & Obrzut, J. E. (1993). Hemisphere and gender differences in mental rotation. *Brain and Cognition*, *22* (1), 42-50.
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotation, a group test of three-dimensional spatial visualisation. *Perceptual and Motor Skills*, *47* (2), 599-604.
- Van Leeuwen C, Lachmann T. (2004) Negative and positive congruence effects in letters and shapes. *Perception and Psychophysics*, *6* (66), 908–925.
- Van Strien, J., & Bouma, A. (1990). Mental Rotation of laterally presented random shapes in males and females. *Brain and Cognition*, *12* (2), 297-303.
- Voyer, D. (1995). Effect of practice on laterality in a mental rotation task. *Brain and Cognition*, *29* (3), 326-335.
- Voyer, D. (1996). On the magnitude of laterality effects and sex differences in functional lateralities. *Laterality*, *1* (1), 51-83.
- Voyer, D. (2011). Time limits and gender differences on paper-and-pencil tests of mental rotation: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, *18* (2), 267-277.
- Voyer, D., & Bryden, M. P. (1990). Gender, level of spatial ability, and lateralization of mental rotation. *Brain and Cognition*, *13* (1), 18-29.
- Voyer, D., & Saunders, K. A. (2004). Gender differences on the mental rotations test: A factor analysis. *Acta Psychologica* *117*(1), 79-94.
- 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* (2), 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* (4), 452-467.
- Yoshino, A., Inoue, M., & Suzuki, A. (2000). A topographic electrophysiologic study of mental rotation. *Cognitive Brain Research*, *9* (2), 121–124.
- Yuille, J. C., & Steiger, J. H. (1982). Nonholistic processing in mental rotation: Some suggestive evidence. *Perception & Psychophysics*, *31* (3), 201-209.
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation: A meta-analysis and review. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20* (1), 1-19.

5 Einzelarbeiten

5.1 Experiment 1

Pellkofer, J., Jansen, P., & Heil, M. (2012). Lateralization of event-related potential effects during mental rotation of polygons. *NeuroReport*, 23 (10), 585-589.

5.2 Experiment 2

Pellkofer, J., Jansen, P., & Heil, M. (2014). Sex-specific lateralization of event-related potential effects during mental rotation of polygons. *NeuroReport*, 25 (11), 848–853.

Lateralization of event-related potential effects during mental rotation of polygons

Julia Pellkofer^a, Petra Jansen^b and Martin Heil^a

Numerous studies have shown that there is an amplitude modulation of the late positivity depending on the angular disparity during mental rotation performance. However, almost all of these studies used characters as stimulus material, whereas studies with different stimuli are rare. In the present experiment, 35 participants were instructed to rotate polygons mentally. Most importantly, with this stimulus material, the well-known event-related potential effects were also present at posterior electrode leads. Interestingly, the amplitude modulation were found to be larger and more reliable over left than over right posterior electrode leads, a finding reported previously for characters as stimuli, although not consistently. Thus, the present data suggest that the left lateralization of event-related potential effects during mental rotation of characters might not be because of their 'verbal nature',

but might suggest a stronger involvement of the left parietal cortex during mental rotation *per se*, a suggestion that needs to be addressed with methods providing a higher spatial resolution. *NeuroReport* 23:585–589 © 2012 Wolters Kluwer Health | Lippincott Williams & Wilkins.

NeuroReport 2012, 23:585–589

Keywords: cognition, event-related potentials, lateralization, mental rotation

^aInstitute of Experimental Psychology, Heinrich Heine University, Düsseldorf and ^bInstitute of Sport Science, University of Regensburg, Regensburg, Germany

Correspondence to Martin Heil, PhD, Institute of Experimental Psychology, Heinrich Heine University, 40225 Düsseldorf, Germany
Tel: +49 211 811 4568; fax: +49 211 811 3490;
email: martin.heil@uni-duesseldorf.de

Received 16 March 2012 accepted 20 March 2012

Introduction

The process of imagining the representation of an object turning around is called mental rotation [1]. It is an important aspect of the general class of spatial transformations as well as a critical ingredient in spatial intelligence. Mental rotation seems to be a cognitive process implemented, among other areas, in the parietal cortex [2] working in a continuous, analogous manner [3]. The response times (RTs) increase linearly with increasing angular disparity of the stimuli used, whereas characters as stimuli induce curvilinear RT functions [1,4].

Using characters as stimuli, a large number of studies have shown that in a mental rotation task, the event-related potential (ERP) amplitude is systematically related to the orientation of the stimulus (for a review, see Heil [4]). The stimulus-evoked positivity becomes relatively more negative (or less positive, respectively) with increasing angular disparities from the upright [5]. Therefore, it was suggested that the decrease in the positivity is caused by an increase in a slow negativity that should be understood as an electrophysiological correlate of mental rotation itself. This idea was validated in a large number of studies suggesting that the ERP effect observed during mental rotation is indeed highly specific for the mental rotation process itself [4]. The mere classification of a character as a digit or a letter is carried out without mental rotation [6] and, accordingly, an amplitude modulation because of character orientation present in a parity judgment task was absent in a character classification task [7]. Moreover, it was shown that the presence of the amplitude modulation depends on whether

the process of mental rotation is executed or not, but is not dependent on whether the response is executed or not [8]. Finally, evidence was provided [9] that not only the process of mental rotation but also the amplitude modulation itself was delayed, when either the perceptual quality of the stimulus was reduced or when character discrimination was more difficult. Taken together, evidence suggests that the ERP effect observed during mental rotation with characters indeed is highly specific for the process of mental rotation itself. Finally, the amplitude modulation as a function of character orientation was obtained maximally at parietal electrodes, either lateralized with larger effects over the left compared with the right hemisphere [10] or with a bilateral distribution [11], probably because of differences in strategy or performance level. In addition, the notoriously low power of most ERP studies because of the rather small sample sizes (usually less than 20 participants) does not allow unequivocal conclusions. The left lateralization, if observed, is usually traced back to the 'verbal' nature of the characters used [10].

All studies mentioned above, however, used characters as stimulus material and this is also true for most published data measuring ERPs during mental rotation. For example, Milivojevic *et al.* [12] compared the scalp topographies of the amplitude modulation during mental rotation and mental paper folding, Muthukumaraswamy *et al.* [13] during mental rotation and mental size transformation, and Rösler *et al.* [14] during mental rotation and mental arithmetic. Hamm *et al.* [15] examined the differences in RTs and amplitudes between normal and backward presented

stimuli. The amplitude effect during mental rotation of characters was also used to examine sex differences [16,17] or developmental changes in ERP topography [18].

The fact that the majority of ERP studies of mental rotation used characters as stimuli is comprehensible but at the same time problematic. Characters have the methodological advantage that only a single stimulus needs to be presented (which has to be compared with its long-term memory representation) and that the variance of RT (and thus, of ERP latencies) is comparably low [19]. Nevertheless, one has to be cautious in generalizing the results obtained with characters to stimuli different from those. As characters are massively overlearned, certain effects differ from those of less familiar shapes [19,20]. Most importantly, the curved RT function for mental rotation of characters deviates from the linear function shown for all other stimuli such as three-dimensional block figures [1] or polygons [19]. Finally, using, for example, polygons as stimuli would allow to manipulate their complexity systematically [21], and thus might allow to induce complexity-related variations in the strategy used [22].

That the 'rotation negative shift' is also existent with polygons as stimuli was shown by Pierret *et al.* [23], to the best of our knowledge the only existing ERP study that used polygons. The authors did not report statistics for lateralization results, but according to their fig. 3, the orientation effect again seemed to be larger over left compared with right posterior electrodes. This might even be an underestimation because of the special design used by Pierret *et al.* [23]. Instead of presenting two polygons side by side, each polygon was presented for 500 ms with an interstimulus interval of 750 ms. This successive presentation mode uses a massive working memory load, and as a consequence, one might suggest that the (visual impression of a) left lateralization of the ERP effect because of the mental rotation process might be an underestimation as the memory load might cause a (relative) right lateralization.

Therefore, the present study was carried out with two goals. The first and major goal was to add new evidence to support the idea that the amplitude modulation of the ERPs is indeed a neurophysiological correlate of the mental rotation process itself independent of the stimulus material by using polygons. As a second goal, we aimed to identify whether the left lateralization of the ERP effect quite often observed during mental rotation of characters is also present with polygons when the memory load of the task is reduced by presenting the two polygons side by side.

Participants and methods

Participants

Thirty-five students between the age of 19 and 29 years (18 women, 17 men) participated in this study for payment. All participants had normal or normally corrected visual acuity and were right handed according to self-report.

Apparatus and stimuli

The experiment took place in a windowless, sound-proofed, and electrically shielded room. Participants sat at a distance of 50 cm from a 19-inch monitor. An answer pad with two buttons was to be used with the left and the right index finger. Assignment of finger side and same versus different response was counterbalanced across participants. The experimental stimuli consisted of three different polygons with five or six vertices [19]. Each polygon had a size of 8×8 cm on the screen with a space of 4 cm between them. The two polygons were either identical figures or one was mirror reversed. The angular disparity between the two polygons was 30, 90, or 150° in a clockwise or a counter-clockwise direction.

Procedure

The test sessions lasted about 90–120 min. After electrode placement, participants had to perform 72 unrecorded practice trials with the same polygons used during the experiment proper to become familiar with the stimuli. In the test phase, each combination of polygon, version, and orientation occurred 12 times, resulting in 432 trials, which were divided into blocks of 72 trials. Each trial began with the 1000 ms presentation of a fixation asterisk in the center of a blank screen. Thereafter, the pair of polygons appeared and remained on the screen until a response key was pressed. There was no time limit for the response, but participants were instructed to respond as quickly and as accurately as possible and to avoid eye as well as other body movements during electroencephalography (EEG) recording. During the unrecorded 72 practice trials, a feedback (either a '+' or a '-') indicated the correctness of the response. During the experiment proper, no feedback was provided. Trials were separated by varying intervals of 1–2 s. After a block of 72 trials, each participant could choose a short break. They were asked to start the new block by pressing a button.

Electroencephalography analysis

The EEG was recorded with Ag–AgCl electrodes with the actiCap system (Brain Products GmbH, Munich, Germany) from 26 positions: F3, Fz, F4, FC5, FC1, FC2, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, TP9, CP5, CP1, CP2, CP6, TP10, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, and O2. AFz was used as ground and FCz as reference. Offline, EEG data were digitally referenced against the average reference. The vertical and the horizontal electro-oculogram were taken as bipolar channels. Electrode impedance was maintained below $5 \text{ k}\Omega$. Band pass was set from DC to 40 Hz; the digitization rate was 250 Hz. All trials were inspected offline. Those contaminated with artifacts because of blinks, eye, or body movements and those with false responses were rejected. The semiautomatic artifact rejection excluded epochs if voltage steps between two sampling points exceeded $80 \mu\text{V}$, if the absolute amplitude exceeded $\pm 175 \mu\text{V}$, if the absolute voltage difference within a segment exceeded $225 \mu\text{V}$, or if activity was less than $5 \mu\text{V}$.

for a time epoch longer than 150 ms. Electrode drift artifacts were corrected according to the method suggested by Hennighausen *et al.* [24]. ERPs were extracted from the edited set of raw data by averaging single trials separately for participants, electrodes, and experimental conditions. The average amplitude in the epoch 500–900 ms after stimulus presentation was used as a dependent variable, referenced to a 100 ms-prestimulus baseline [4].

Statistical analysis

Only trials with the correct response were used for analyses. Furthermore, as the direction of rotation (clockwise vs. counterclockwise) had no effect at all, data are presented collapsed across this factor. RTs and error rates were tested statistically in an (ANOVA) including the within-subjects factors of ‘orientation’ (30, 90, and 150°) and ‘response’ (same vs. different). For the ERPs, statistical effects were tested in an ANOVA including the within-subject factors ‘orientation’, ‘response’, and ‘electrode position’. To test whether the mental rotation effect was lateralized, electrodes were clustered (left hemisphere cluster: CP5, CP1, P7, P3; right hemisphere cluster: CP6, CP2, P8, P4). A four-way repeated-measures ANOVA with the within-subjects factors ‘orientation’, ‘response’, ‘hemisphere’ (left vs. right), and ‘electrode’ (CP5/6, CP1/2, P7/8, P3/4) was carried out. The significance levels of all analyses of variance were corrected to compensate for nonsphericity of the data.

Results

Behavioral data

Before analyses, RT data were trimmed. RTs more than two SDs above or below the mean per participant and per condition were excluded (3% of the data, on average). RTs served as a manipulation check to validate that participants were indeed using mental rotation. We found significant main effects of orientation, $F(2, 68) = 101.26$, and response, $F(1, 34) = 81.52$, both P value less than 0.01. In agreement with the literature [19], orientation effects were larger for ‘same’ compared with ‘different’ responses [$F(2, 68) = 42.93$, $P < 0.01$]. The greater the angular disparity, the longer the RTs (‘same’ responses: 30°: $M = 802$ ms, $SD = 201$; 90°: $M = 959$ ms, $SD = 296$; 30°: $M = 1084$ ms, $SD = 317$; ‘different’ responses: 30°: $M = 1033$ ms, $SD = 291$; 90°: $M = 1071$ ms, $SD = 312$; 30°: $M = 1193$ ms, $SD = 341$). The RTs for all three angular disparities differed from each other ($P < 0.05$).

Error rates also increased with increasing angular disparity, $F(2, 68) = 17.49$, P value less than 0.01. The greater the angular disparity, the larger the error rate (30°: $M = 3.4\%$, $SD = 3.7$; 90°: $M = 5.1\%$, $SD = 4.4$; 150°: $M = 7.1\%$, $SD = 6.3$).

Event-related potentials

A three-way ANOVA showed a main effect of orientation [$F(2, 68) = 7.68$, $P < 0.05$] and electrode [$F(26, 884) = 21.52$,

Table 1 Analysis of variance results for those electrode sites at which the main effect of ‘orientation’ was obtained ($P < 0.05$ for all)

Electrode	$F(2, 68)$	Effect size (partial η^2)
Fz	6.02	0.150
F4	7.90	0.188
FC6	3.77	0.100
T8	11.26	0.249
C3	15.56	0.314
CP5	9.68	0.222
CP1	15.10	0.307
CP2	10.90	0.243
P7	5.42	0.137
P3	39.64	0.538
Pz	31.48	0.481
P4	15.66	0.315
TP10	5.95	0.149
O1	4.12	0.108

Electrodes at which the mean amplitudes for all three angular disparities differed are highlighted in gray.

$P < 0.05$] as well as an interaction of orientation by electrode [$F(52, 1768) = 8.43$, $P < 0.01$]. Therefore, a repeated-measure ANOVA with factor orientation was carried out for each electrode separately. The significant effects are presented in Table 1. With increasing angular disparity, the elicited amplitude became more negative (Fig. 1). The orientation effect was strongest at centroparietal electrode leads (electrodes C3, CP1, P3, Pz, and P4), with significant differences between all three angular orientations (all $P < 0.05$, adjusted for multiple comparisons with the Bonferroni method).

Lateralization

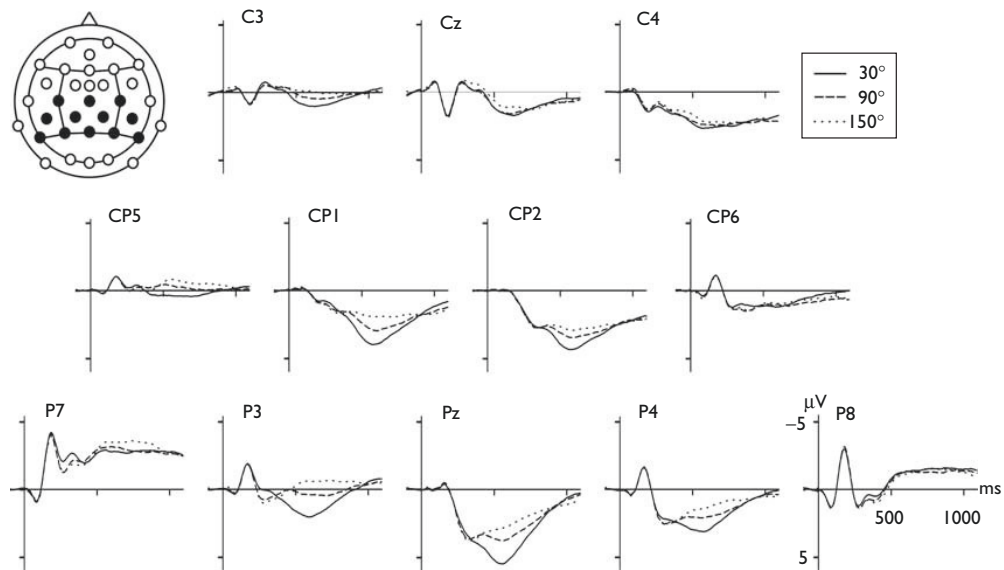
To test whether the mental rotation effect was lateralized or not, a four-way ANOVA with the factors orientation, response, hemisphere, and electrode was carried out, which showed, in addition to the significant main effects of factors orientation [$F(2, 68) = 32.63$], response [$F(1, 34) = 13.22$], hemisphere [$F(1, 34) = 17.47$], and electrode [$F(3, 102) = 85.62$; all $P < 0.01$], significant interaction effects of the factors orientation \times response [$F(2, 68) = 4.36$, $P < 0.05$] and orientation \times electrode [$F(6, 204) = 11.69$, $P < 0.01$].

Most importantly, however, a significant interaction effect of orientation \times hemisphere [$F(2, 68) = 8.72$, $P < 0.01$] was observed. Pairwise comparisons (Bonferroni’s adjusted) showed that the amplitude effect as a function of angular disparity was larger over the left than over the right hemisphere (Fig. 2). No other interaction term was found to be significant, especially not the interaction orientation \times hemisphere \times electrode [$F(6, 204) = 1.87$, $P > 0.10$], suggesting that the left lateralization was consistent across the cluster used.

Discussion

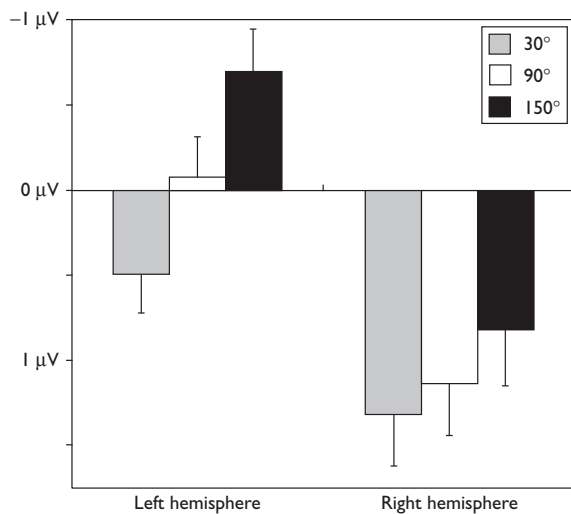
The amplitude modulation as a function of angular disparity was replicated even though polygons were used as the stimulus material. Thus, the amplitude modulation is in fact present if stimuli different from letters were

Fig. 1



Event-related potentials as a function of angular disparity. Stimulus presentation was at $t=0$ ms, negativity is up.

Fig. 2



Mean voltage over left (CP5, CP1, P7, P3) and right (CP6, CP2, P8, P4) posterior electrode locations as a function of angular disparity. Error bars indicate the SE of the mean.

used and if the two polygons to be compared were presented side by side. Therefore, the amplitude modulation of the ERPs over the parietal cortex should indeed be understood as a neurophysiological correlate of the mental rotation process. Nevertheless, it would be useful to show that the diverse validation studies of this

idea on the basis of characters (see above) indeed do also hold with a different stimulus material, for example the polygons used here. Polygons do have a number of advantages, for example they are easy to generate, they are not overlearned, and even more importantly, their complexity can easily be manipulated systematically [21]. Moreover, polygons were the only type of stimuli that elicited sex differences in the speed of mental rotation [19]. Therefore, it was an important prerequisite for future research to show that the ERP amplitude modulation as a function of orientation indeed was present with polygons, something not trivial at all as three-dimensional block figures did not induce that amplitude modulation [25].

Second, the amplitude modulation was clearly lateralized to the left hemisphere posterior electrodes. This is in agreement with a number of ERP studies that used characters as stimuli (for a review, see Beste *et al.* [10]). For these studies, it was argued that the left lateralization might be because of the 'verbal' aspects of characters. Our present study suggests that this explanation might be an oversimplification. Of course, one cannot be sure about the amount of verbalization used while solving the task and one can also not be sure whether a left lateralization at the level of scalp electrodes reliably reflects a left lateralization of neural generators (but see Rösler *et al.* [26] for respective evidence). This question can only be resolved if high spatial resolution imaging techniques such as functional MRI are used. Our data, however, suggest that it might be worth conducting the respective study if the power of the study is sufficient.

Finally, our data show that the (visual impression of a) left lateralization of the ERP effect during mental rotation of polygons obtained by Pierret *et al.* [23] might indeed have been an underestimation because of the memory load used by successive stimulus presentation. Further data are needed to obtain more data on the lateralization of the ERP effect during mental rotation.

Acknowledgements

This work was funded by German Research Foundation (DFG).

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest.

References

- Shepard RN, Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 1971; **171**:701–703.
- Jordan K, Heinze HJ, Lutz K, Kanowski M, Jäncke L. Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage* 2001; **13**:143–152.
- Heil M, Bajric J, Rösler F, Hennighausen E. A rotation aftereffect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1997; **23**:681–692.
- Heil M. The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology* 2002; **39**:535–545.
- Wijers AA, Otten LJ, Feenstra S, Mulder G, Mulder LJM. Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology* 1989; **26**:452–467.
- Corballis MC, Nagourney R. Latency to categorize disoriented alphanumeric characters as letters or digits. *Can J Psychol* 1978; **23**:186–188.
- Heil M, Bajric J, Rösler F, Hennighausen E. Event-related potentials during mental rotation: disentangling the contributions of character classification and image transformation. *J Psychophysiol* 1996; **10**:326–335.
- Heil M, Rauch M, Hennighausen E. Response preparation begins before mental rotation is finished: evidence from event-related brain potentials. *Acta Psychol* 1998; **99**:217–232.
- Heil M, Rolke B. Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology* 2002; **39**:414–422.
- Beste C, Heil M, Konrad C. Individual differences in ERPs during mental rotation of characters: lateralization, and performance level. *Brain Cogn* 2010; **72**:238–243.
- Lange LF, Heil M, Jansen P. Does children's left hemisphere lateralization during mental rotation depend upon the stimulus material? *J Indiv Differ* 2010; **31**:91–94.
- Milivojevic B, Johnson BW, Hamm JP, Corballis MC. Non-identical neural mechanisms for two types of mental transformation: event related potentials during mental rotation and mental paper folding. *Neuropsychologia* 2003; **41**:1345–1356.
- Muthukumaraswamy SD, Johnson BW, Hamm JP. A high density ERP comparison of mental rotation and mental size transformation. *Brain Cogn* 2003; **52**:271–280.
- Rösler F, Schumacher G, Sojka B. What the brain reveals when it thinks: an event-related potentials during mental rotation and mental arithmetic. *Ger J Psychol* 1990; **14**:185–203.
- Hamm JP, Johnson BW, Corballis MC. One good turn deserves another: an event-related brain potential study of rotated mirror-normal letter discriminations. *Neuropsychologia* 2004; **42**:810–820.
- Gooijes L, Bruggeling EC, Magnee T, Van Strien JW. Sex differences in the latency of the late event-related potential mental rotation effect. *NeuroReport* 2008; **19**:349–353.
- Johnson BW, McKenzie KJ, Hamm JP. Cerebral asymmetry for mental rotation: effects of response hand, handedness and gender. *NeuroReport* 2002; **13**:1929–1932.
- Jansen-Osmann P, Heil M. Developmental aspects of parietal hemispheric asymmetry during mental rotation. *NeuroReport* 2007; **18**:175–178.
- Jansen-Osmann P, Heil M. Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain Cogn* 2007; **64**:217–227.
- Van Leeuwen C, Lachmann T. Negative and positive congruence effects in letters and shapes. *Percept Psychophys* 2004; **6**:908–925.
- Folk MD, Luce R. Effects of stimulus complexity on mental rotation rate of polygons. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1987; **13**:395–404.
- Heil M, Jansen-Osmann P. Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *Q J Exp Psychol* 2008; **61**:683–689.
- Pierret A, Peronnet F, Thevenet M. An electrophysiological study of the mental rotation of polygons. *NeuroReport* 1994; **5**:1153–1156.
- Hennighausen E, Heil M, Rösler F. A correction method for DC drift artifacts. *EEG Clin Neurophysiol* 1993; **86**:199–204.
- Yu QB, Tang YY, Li J, Lu QL, Wang HL, Sui D, *et al.* Sex differences of ERP effects during three-dimensional mental rotation. *NeuroReport* 2009; **20**:43–47.
- Rösler F, Heil M, Röder B. Slow negative brain potentials as reflections of specific modular resources of cognition. *Biol Psychol* 1997; **45**:109–141.

Sex-specific lateralization of event-related potential effects during mental rotation of polygons

Julia Pellkofer^a, Petra Jansen^b and Martin Heil^a

Mental rotation performance has been found to produce one of the largest sex differences in cognition. Many theories suggest that this effect should be accompanied by a sex difference in functional cerebral asymmetry, but empirical data are more than equivocal probably because of (a) the use of inappropriate stimuli and (b) insufficient power of most neurophysiological studies. Therefore, sex differences in mental rotation of polygons were investigated in 122 adults. Men outperformed women on mental rotation speed (as well as on response time and accuracy). On the basis of the electrophysiological brain correlates of mental rotation, we observed a bilateral brain activity for men, whereas women's brain activity was clearly lateralized toward the left hemisphere if and only if mental rotation was involved. Thus, sex differences in functional cerebral asymmetry can indeed

be observed if appropriate stimuli are used in a sufficiently large sample. *NeuroReport* 25:848–853 © 2014 Wolters Kluwer Health | Lippincott Williams & Wilkins.

NeuroReport 2014, 25:848–853

Keywords: cognition, event-related potentials, lateralization, mental rotation, sex differences

^aInstitute of Experimental Psychology, Düsseldorf and ^bInstitute of Sport Science, University of Regensburg, Regensburg, Germany

Correspondence to Martin Heil, PhD, Institute of Experimental Psychology, Heinrich Heine University, 40225 Düsseldorf, Germany
Tel: +49 211 811 4568; fax: +49 211 811 3490;
e-mail: martin.heil@uni-duesseldorf.de

Received 17 April 2014 accepted 24 April 2014

Mental rotation, the ability to imagine the representation of a two-dimensional (2D) or 3D object turning around in mind [1], has been investigated intensively in different fields of neuroscience and of psychology. Mental rotation seems to be a cognitive process implemented, among other areas, in the parietal cortex [2] working in a continuous, analog manner [3]. Response times (RTs) increase linearly with increasing angular disparity of the stimuli used [1].

One of the most consistent findings in mental rotation research is a sex difference favoring men [4]. However, the size and even the mere existence of this sex difference depend on the test and on the stimulus material used [5]. With an effect size of about 1 SD ($d=1$), the 'mental rotation test' (MRT) [6] induces the largest sex effect [4]. The MRT is an accuracy-based paper-test and pencil test using 3D cube figures rotated in depth. When two stimuli, however, are presented with varying angular disparity and the RT is measured, needed to decide whether these match or not, studies have failed to converge on unambiguous results [5]. In addition, recent data suggest that mental rotation RT, on the one hand, and error rates in paper tests and pencil tests of mental rotation, on the other, are independent [7]. Even in a selected sample where men outperformed women in the MRT by as much as $d=1.5$, no sex differences in mental rotation RT with exactly the 3D cube figures of the MRT were found [8]. We investigated mental rotation RT with various stimuli with sufficient sample sizes to allow sex effects a fair chance to manifest [5]. Polygons were the only type of stimuli that showed considerable and reliable sex differences in mental rotation speed,

with $d=0.7$. To sum up, empirical evidence suggests (a) that sex effects are considerable with paper-based and pencil-based psychometric tests such as the MRT, (b) that psychometric and RT-based sex effects are independent, and (c) that the RT effects are limited to polygons as stimuli (see also Heil and Jansen-Osmann [9]).

Psychosocial as well as biological explanations were discussed as causes for the sex effect in mental rotation. In this article, discussion will be focused on sex differences in hemispheric lateralization. Mental rotation is sometimes accompanied by sex-specific lateralization differences in cortical activity [10]. It is suggested that women show a larger left hemisphere involvement during mental rotation than men [11,12]. Women seem to use left hemisphere processing to solve verbal as well as non-verbal tasks, whereas men are supposed to have a more specialized lateralization showing a right hemisphere asymmetry for mental rotation. Nevertheless, results on hemispheric lateralization of mental rotation are far from consistent as numerous studies have reported either no sex effects at all [13] or sex effects that are not in line with the pattern described above [14,15]. This may be partly related to the well-known low power of brain imaging studies based on functional MRI in terms of sex effects. In fact, a sample size of $N=100$ participants is needed on the basis of the (realistic) assumption of a medium sex effect of $d=0.5$ and a level of $\alpha=0.05$ (one-tailed) to ensure a power of 80% ($=1-\beta$), a requirement that realistically cannot be met with functional MRI and is also usually not met with event-related potentials (ERPs).

The functional significance of ERP effects during mental rotation has been studied extensively. The typical finding is that the ERP amplitude over parietal leads becomes more negative the larger the angular disparity during mental rotation [16]. Moreover, the amplitude effects are highly specific [17]: for example, the presence of the amplitude effect depends on the presence of mental rotation [18], but is independent of the presence of an overt response [19]. Moreover, we [20] 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. As outlined above, however, the well-known low power because of small sample sizes might not be the only problem leading to equivocal ERP results with respect to sex effects. The majority of ERP studies of mental rotation used characters as stimuli because of the methodological advantages that only a single stimulus needs to be presented and that the variance in RT (and thus, of ERP latencies) is comparably low [16]. Characters as stimuli for mental rotation, however, usually do not show sex effects at all, either at a behavioral [5] or at a neurophysiological level [13]. Therefore, the aim of the present study was to explore sex-specific lateralization effects during mental rotation with a sufficient statistical power and with polygons as the stimulus material, which seems to be best suited for this purpose [5,9,21].

Methods

Participants

One hundred and twenty-two students between 19 and 38 years of age [62 women, mean age 23.8 years ($SD=2.9$), and 60 men, mean age 24.6 years ($SD=3.0$)] participated in this study for course credit or payment. They were naive to the purpose of the study. All participants had normal or normally corrected visual acuity and were right-handed according to self-report.

Apparatus and stimuli

The experiment was conducted in a windowless, soundproofed, and electrically shielded room.

Participants sat at a distance of 50 cm from a 19-inch monitor. An answer pad with two buttons was to be used with the left and right index finger. Assignment of finger side and same versus different response was counter-balanced across participants. The experimental stimuli consisted of three different polygons with five or six vertices (Fig. 1) [5]. Each polygon was 8 cm by 8 cm in size on the screen with a space of 4 cm between them. The two polygons were either identical figures or one was mirror-reversed. The angular disparity between the two polygons was 30°, 90°, or 150° in a clockwise or a counter-clockwise direction.

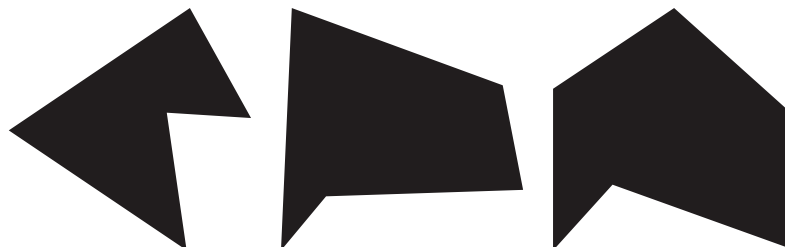
Procedure

Test sessions lasted about 120–150 min. After electrode placement, participants had to perform 72 unrecorded practice trials with the same polygons used during the experiment proper to become familiar with the stimuli. In the test phase, each combination of polygon, version, and orientation occurred 24 times, resulting in 864 trials that were divided into blocks of 72 trials. Each trial began with the 1000 ms presentation of a fixation asterisk in the center of a blank screen. Thereafter, the pair of polygons appeared and remained on the screen until a response key was pressed. There was no time limit for the response, but participants were instructed to respond as quickly and as accurately as possible and to avoid eye as well as other body movements during electroencephalogram (EEG) recording. During the unrecorded 72 practice trials, a feedback (either a '+' or a '-') indicated the correctness of the response. During the experiment proper, no feedback was provided. Trials were separated by varying intervals of 1–2 s. After a block of 72 trials, each participant could choose a short break. They were asked to start the new block by pressing a button.

Electroencephalogram analysis

The EEG was recorded with Ag–AgCl electrodes using the actiCap system (Brain Products GmbH, Gilching, Germany) from 26 positions: F3, Fz, F4, FC5, FC1, FC2, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, TP9, CP5, CP1, CP2, CP6,

Fig. 1

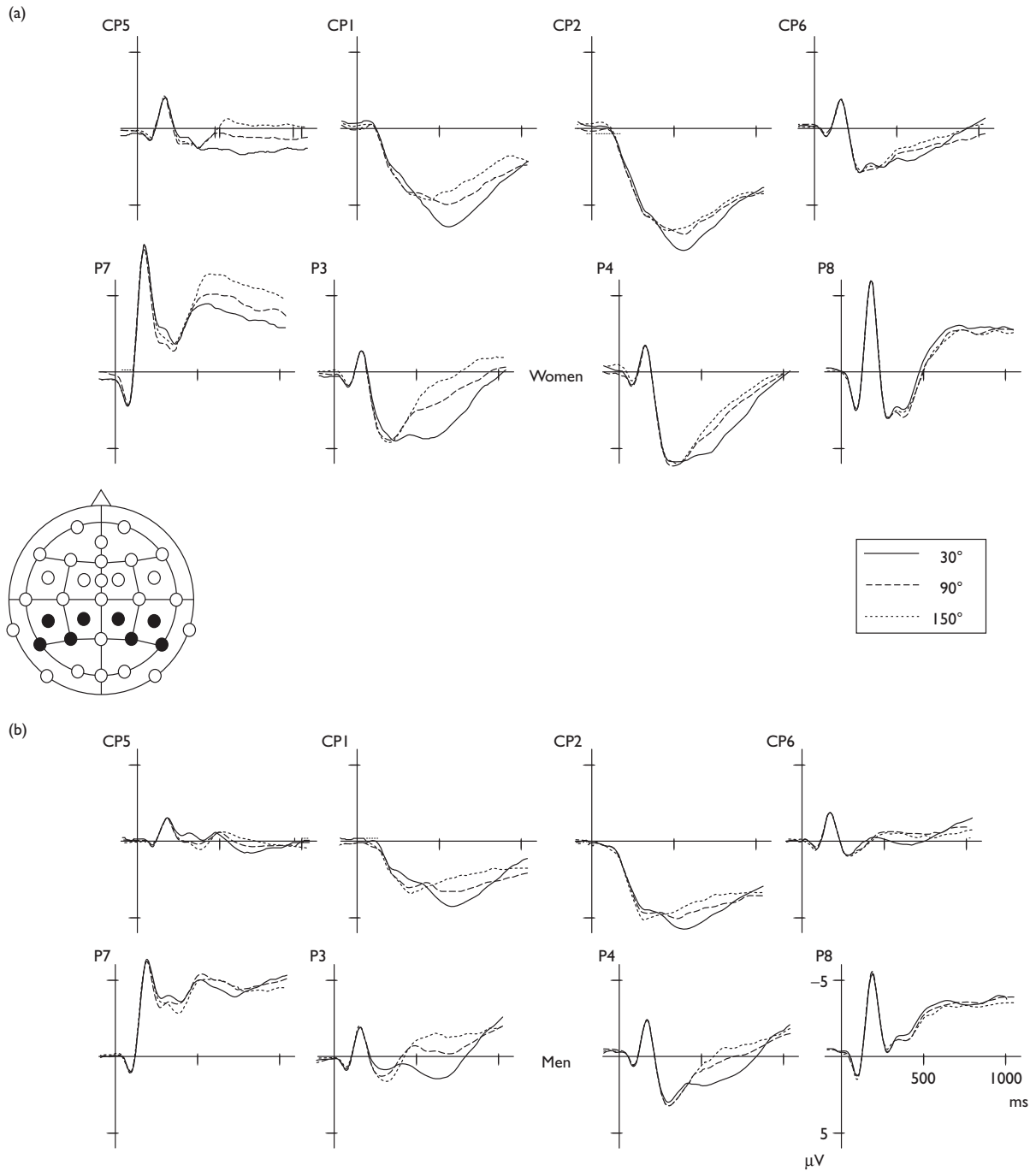


Polygons used for mental rotation.

TP10, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, and O2. AFz was used as ground and FCz as a reference. Off-line, EEG data

were digitally referenced against the average reference. The vertical and the horizontal Electrooculogram (EOG)

Fig. 2



ERPs as a function of angular disparity presented separately for women (a) and men (b). Stimulus presentation was at $t = 0$ ms, negativity is up. ERPs, event-related potentials.

were considered as bipolar channels. Electrode impedance was maintained below 5 k Ω . Band pass was set from DC to 40 Hz; the digitization rate was 250 Hz. All trials were inspected off-line. Those contaminated with artifacts because of blinks, eye, or body movements and those with incorrect responses were rejected. The semi-automatic artifact rejection excluded epochs if voltage steps between two sampling points exceeded 80 μ V, if the absolute amplitude exceeded ± 175 μ V, if the 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 ms. Electrode drift artifacts were corrected according to the method suggested by Hennighausen *et al.* [22]. ERPs were extracted from the edited set of raw data by averaging single trials separately for participants, electrodes, and experimental conditions. The average amplitude in the epoch 500–900 ms after stimulus presentation was used as a dependent variable, referenced to a 100 ms prestimulus baseline (all of these details were defined before data acquisition on the basis of previous studies, e.g. Pellkofer *et al.* [21]).

Statistical analysis

Only trials with correct responses were used for analyses. Furthermore, as direction of rotation (clockwise vs. counter-clockwise) had no effect at all, data are presented collapsed across this factor. Behavioral data were tested statistically in an analysis of variance (ANOVA) including the between-subjects factor 'sex' and the within-subjects factors of 'orientation' (30°, 90°, and 150°) and 'response' (same vs. different). To test whether the ERP mental rotation effect was lateralized, electrodes were clustered (left hemisphere cluster: CP5, CP1, P7, and P3; right hemisphere cluster: CP6, CP2, P8, and P4; see Pellkofer *et al.* [21]). A five-way repeated-measures ANOVA with the between-participant factors 'sex' and the within-participant factors 'orientation', 'response', 'hemisphere' (left vs. right), and 'electrode' (CP5/6, CP1/2, P7/8, P3/4) was carried out. Significance levels of all ANOVAs were corrected to compensate for nonsphericity of the data.

Results

Behavioral data

Before analyses, RT data were trimmed. RTs more than 2 SDs above or below the mean per participant and per condition were excluded (3% of the data, on average). RTs served as a manipulation check to validate that the participants were indeed using mental rotation. In line with the literature, we found significant main effects of orientation, $F(2, 68) = 101.26$, and response, $F(1, 34) = 81.52$, both $P < 0.01$. Moreover, orientation effects were larger for 'same' compared with 'different' responses [$F(2, 68) = 42.93$, $P < 0.01$]. The greater the angular disparity, the longer the RTs ('same' responses: 30°: $M = 802$ ms, $SD = 201$; 90°: $M = 959$ ms, $SD = 296$; 30°: $M = 1084$ ms, $SD = 317$; 'different' responses: 30°: $M = 1033$ ms, $SD = 291$; 90°: $M = 1071$ ms, $SD = 312$; 30°:

$M = 1193$ ms, $SD = 341$). The RTs for all three angular disparities differed from each other ($P < 0.05$).

Most importantly, a significant interaction of orientation by sex [$F(2, 240) = 3.03$, $P < 0.05$] was observed. Men responded faster than women, and this difference was greater the larger the angular disparity (reaction times men: 30°: $M = 968$ ms, $SD = 313$; 90°: $M = 1168$ ms, $SD = 397$; 150°: $M = 1334$ ms, $SD = 473$; reaction times women: 30°: $M = 1007$ ms, $SD = 290$; 90°: $M = 1237$ ms, $SD = 378$; 150°: $M = 1449$ ms, $SD = 478$).

The most direct test of a sex effect in mental rotation, however, is based on estimates of mental rotation speed. Therefore, the comparison of main interest 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. The results validate the aforementioned conclusions. For men, the mental rotation speed was higher than for women [423°/s vs. 347°/s; $F(1, 120) = 4.68$, $P < 0.05$]. The effect size of the sex difference in mental rotation speed, thus, amounted to $d = 0.4$.

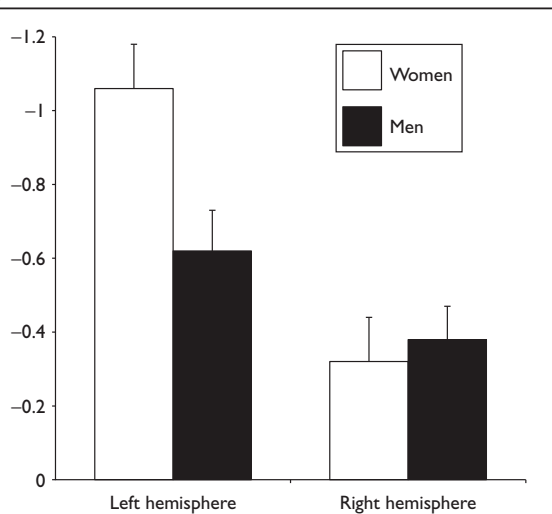
Error rates also increased with increasing angular disparity [$F(2, 240) = 108.19$, $P < 0.01$]. The greater the angular disparity, the larger the error rate (30°: $M = 3.7\%$, $SD = 3.7$; 90°: $M = 7.4\%$, $SD = 5.2$; 150°: $M = 10.9\%$, $SD = 7.1$). We found a significant interaction effect of sex by orientation [$F(2, 240) = 6.98$, $P < 0.01$]. Men made fewer errors than women (men: 30°: $M = 3.5\%$, $SD = 3.4$; 90°: $M = 6.7\%$, $SD = 5.1$; 150°: $M = 8.9\%$, $SD = 6.6$; women: 30°: $M = 3.8\%$, $SD = 4.1$; 90°: $M = 8.1\%$, $SD = 5.3$; 150°: $M = 12.8\%$, $SD = 7.2$), thus excluding a speed–accuracy trade-off explanation for the observed sex effects in RT or in mental rotation speed.

Event-related potentials

With respect to ERP data, a five-way ANOVA with the factors sex, orientation, response, hemisphere, and electrode was carried out to test whether the brain patterns of men and women differed with respect to lateralization. The ANOVA showed significant main effects of factors sex [$F(1, 120) = 6.14$, $P < 0.05$], orientation [$F(2, 240) = 52.03$], hemisphere [$F(1, 120) = 26.98$], and electrode [$F(3, 360) = 173.39$; all $P < 0.01$]. Moreover, a significant interaction of orientation by electrode [$F(6, 720) = 23.00$, $P < 0.01$] was found, indicating larger orientation effects over posterior electrodes, a well-known finding [16].

Most importantly, however, and as predicted, a significant three-way interaction effect of sex by orientation by hemisphere [$F(2, 240) = 4.59$, $P < 0.05$] was observed (Fig. 2). Pairwise comparisons (Bonferroni adjusted) indicated that the mean amplitude effect as a function of angular disparity was larger over the left than over the right hemisphere for women (left cluster: 30°: $M = 0.78$ μ V, $SD = 2.0$, 90°: $M = 0.21$ μ V, $SD = 2.0$, 150°:

Fig. 3



Mean mental rotation effect (voltage difference of 150° condition minus the 30° condition) over left (averaged across CP5, CP1, P7, and P3) and right (averaged across CP6, CP2, P8, and P4) posterior electrode locations as a function of sex. Error bars indicate the SEM.

$M = -0.27 \mu\text{V}$, $SD = 2.1$; right cluster: 30°: $M = 1.58 \mu\text{V}$, $SD = 2.1$, 90°: $M = 1.30 \mu\text{V}$, $SD = 2.1$, 150°: $M = 1.26 \mu\text{V}$, $SD = 2.1$), whereas men's brain activity, however, was not lateralized to one hemisphere (left cluster: 30°: $M = 0.06 \mu\text{V}$, $SD = 1.5$, 90°: $M = -0.28 \mu\text{V}$, $SD = 1.6$, 150°: $M = -0.56 \mu\text{V}$, $SD = 1.5$; right cluster: 30°: $M = 0.57 \mu\text{V}$, $SD = 2.2$, 90°: $M = 0.31 \mu\text{V}$, $SD = 2.3$, 150°: $M = 0.19 \mu\text{V}$, $SD = 2.2$). In addition, over the left hemisphere, the amplitude modulation as a function of angular disparity was larger for women than for men ($d = 0.5$), with no significant difference over the right hemisphere (Fig. 3).

Discussion

First of all, this study replicated a number of recent findings, thus validating the experimental approach used. Men outperformed women with respect to error rates, RT, and, most importantly, with respect to mental rotation speed [5,9]. Moreover, the ERP amplitude modulation as a function of angular disparity was also replicated [16,21]. Thus, the amplitude modulation is in fact also present if polygons instead of letters were used and, as a consequence, if the two polygons to be compared were presented side by side instead of a single stimulus to be compared with its memory representation (see also, e.g., Pellkofer *et al.* [21]). Therefore, the amplitude modulation of the ERPs over the parietal cortex should indeed be understood as a neurophysiological correlate of the mental rotation process. Nevertheless, it would still be useful to show that the diverse validation studies of this idea almost exclusively based on characters as stimuli (see above and Heil [16]) indeed do also hold with different stimulus material, for

example, the polygons used here. Polygons do have a number of advantages, for example, they are easy to generate, they are not overlearned, and even more importantly, their complexity can easily be manipulated systematically [23].

More importantly, however, the present study also yielded new and theoretically important results. In line with a number of theories, we observed sex-specific lateralization differences as a function of angular disparity of the stimuli to be mentally rotated. Although such a pattern of results is more or less uniformly predicted, empirical evidence is rare and at least equivocal. We argued that this equivocal pattern of results is because of (a) the well-known low power of ERP or MRI studies and (b) the use of mental rotation stimuli not suitable to elicit sex differences.

In two recent studies, we consistently presented ERP evidence for a larger left hemispheric amplitude modulation as a function of mental rotation in preschool girls using characters and animal drawings as stimuli, but realizing a sufficient power to observe medium effect sizes [24,25]. A large sample size alone, however, is not sufficient in itself: with adults, no sex-specific lateralization effects were found during mental rotation of characters, although a sufficient power was realized [13]. The present study, however, fulfilled both requirements, that is a sufficient power plus suitable stimuli to elicit sex effects [5]. As a consequence, the theoretically predicted pattern of larger left hemisphere involvement during mental rotation of women indeed was observed here. The present data clearly argue that studies investigating sex effects in neurophysiological data should only be planned (and, indeed, should only be published) if a sufficient sample size is realized (i.e. at least $N = 100-120$, given that the effect size of sex effects rarely exceeds $d = 0.5$).

At the behavioral level of mental rotation speed, previous research [9] showed that the sex effect increased with increasing complexity of the polygons used. As a consequence, one would predict even larger sex-specific lateralization differences in ERPs when more complex polygons are used. Further data are needed to learn more about the sex-specific lateralization of the ERP effect during mental rotation, not only for polygons as stimuli used.

Acknowledgements

Supported by German Research Foundation (DFG).

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest.

References

- 1 Shepard RN, Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 1971; 171:701-703.

- 2 Jordan K, Heinze HJ, Lutz K, Kanowski M, Jäncke L. Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *Neuroimage* 2001; **13**:143–152.
- 3 Heil M, Bajric J, Rösler F, Hennighausen E. A rotation after effect changes both the speed and the preferred direction of mental rotation. *J Exp Psychol Hum Percept Perf* 1997; **23**:681–692.
- 4 Voyer D, Voyer S, Bryden MP. Magnitude of sex differences in spatial abilities: a meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychol Bull* 1995; **117**:250–270.
- 5 Jansen-Osmann P, Heil M. Suitable stimuli to obtain (no) gender differences in the speed of cognitive processes involved in mental rotation. *Brain Cogn* 2007; **64**:217–227.
- 6 Peters M, Laeng B, Latham K, Jackson M, Zaiyouna R, Richardson C. A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. *Brain Cogn* 1995; **28**:39–58.
- 7 Voyer D, Butler T, Cordero J, Brake B, Silbersweig D, Stern E, Imperato-McGinley J. The relation between computerized and paper-and-pencil mental rotation tasks: a validation study. *J Clin Exp Neuropsychol* 2006; **28**:928–939.
- 8 Peters M. Sex differences and the factor of time in solving Vandenberg and Kuse mental rotation problems. *Brain Cogn* 2005; **57**:176–184.
- 9 Heil M, Jansen-Osmann P. Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *Q J Exp Psychol* 2008; **61**:683–689.
- 10 Hugdahl K, Thomsen T, Ersland L. Sex differences in visuo-spatial processing: an fMRI study of mental rotation. *Neuropsychologia* 2006; **44**:1575–1583.
- 11 Howard R, Fenwick P, Brown D, Norton R. Relationship between CNV asymmetries and individual differences in cognitive performance, personality and gender. *Int J Psychophysiol* 1992; **13**:191–197.
- 12 Heil M, Rolke B, Engelkamp J, Rösler F, Özcan M, Hennighausen E. Event-related brain potentials during recognition of ordinary and bizarre action phrases following verbal and subject-performed encoding conditions. *Eur J Cogn Psychol* 1999; **11**:261–280.
- 13 Beste C, Heil M, Konrad C. Individual differences in ERPs during mental rotation of characters: lateralization, and performance level. *Brain Cogn* 2010; **72**:238–243.
- 14 Gootjes L, Bruggeling EC, Magnee T, Van Strien JW. Sex differences in the latency of the late event-related potential mental rotation effect. *Neuroreport* 2008; **19**:349–353.
- 15 Heil M, Rösler F, Hennighausen E. Topography of brain electrical activity dissociates the retrieval of spatial versus verbal information from episodic long-term memory in humans. *Neurosci Lett* 1997; **222**:45–48.
- 16 Heil M. The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology* 2002; **39**:535–545.
- 17 Bajric J, Rösler F, Heil M, Hennighausen E. On separating processes of event categorization, task preparation, and mental rotation proper in a handedness recognition task. *Psychophysiology* 1999; **36**:399–408.
- 18 Heil M, Bajric J, Rösler F, Hennighausen E. Event-related potentials during mental rotation: disentangling the contributions of character classification and image transformation. *J Psychophysiol* 1996; **10**:326–335.
- 19 Heil M, Rauch M, Hennighausen E. Response preparation begins before mental rotation is finished: evidence from event-related brain potentials. *Acta Psychol (Amst)* 1998; **99**:217–232.
- 20 Heil M, Rolke B. Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology* 2002; **39**:414–422.
- 21 Pellkofer J, Jansen P, Heil M. Lateralization of event-related potential effects during mental rotation of polygons. *NeuroReport* 2012; **23**:585–589.
- 22 Hennighausen E, Heil M, Rösler F. A correction method for DC drift artifacts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993; **86**:199–204.
- 23 Folk MD, Luce R. Effects of stimulus complexity on mental rotation rate of polygons. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1987; **13**:395–404.
- 24 Hahn N, Jansen P, Heil M. Preschoolers' mental rotation: sex differences in hemispheric asymmetry. *J Cogn Neurosci* 2010; **22**:1244–1250.
- 25 Hahn N, Jansen P, Heil M. Preschoolers' mental rotation of letters: sex differences in hemispheric asymmetry. *Cogn Neurosci* 2010; **1**:261–267.

6 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe unter Beachtung der „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf“ erstellt worden ist. Die Dissertation wurde in der vorliegenden oder ähnlichen Form bei noch keiner anderen Institution eingereicht. Ich habe bisher keine erfolglosen Promotionsversuche unternommen.

Düsseldorf, den

Julia Elisabeth Pellkofer