

Aus der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen
zwischen gesunden Männern und Frauen
unter Berücksichtigung der Händigkeit**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Juliane B. Flohrer

aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. G. Juckel
2. Prof. Dr. med. A. Heinz
3. Prof. Dr. med. U. Hegerl

Datum der Promotion: 09.02.2009

*„ Was uns in Schwierigkeiten bringt, ist nicht das, was wir nicht wissen.
Es ist das, was wir mit Sicherheit wissen, was jedoch in Wahrheit falsch ist!“*

Mark Twain

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	6
2 Einleitung.....	8
2.1 Grundlagen zur Lateralität.....	8
2.1.1 Hemisphärische Asymmetrie.....	8
2.1.2 Die Händigkeit als herausragendes Asymmetriemerkmal.....	10
2.1.3 Geschlecht und hemisphärische Lateralität	16
2.1.4 Interhemisphärische Verbindung.....	18
2.2 Das Elektroenzephalogramm als nichtinvasive Messmethode	19
2.2.1 EEG - Grundlagen.....	19
2.2.2 EEG-Kohärenzen - Grundlagen	20
2.2.3 EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von Geschlecht, Händigkeit und Alter.....	21
2.2.4 EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von individuellen Fähigkeiten.....	23
2.2.5 EEG-Kohärenzen in der medizinischen Diagnostik.....	24
3 Zielstellung.....	25
3.1 Beurteilung bisheriger Forschungsergebnisse und Konsequenzen für eine Aufgabenstellung	25
3.2 Entwicklung der Aufgabenstellung	26
4 Material und Methoden.....	28
4.1 Auswahl der Probanden.....	28
4.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien.....	28
4.1.2 Einordnung der Händigkeit.....	29
4.2 Technik der EEG-Ableitung und -Aufzeichnung.....	32
4.3 Versuchsablauf	34
4.4 Verarbeitung der gewonnenen Daten	35
4.4.1 Erfassung und Auswertung des nonverbalen Tests (LPS-3).....	35
4.4.2 Auswertung des digitalen EEGs.....	36
4.4.3 Statistische Auswertung.....	37

5 Ergebnisse.....	39
5.1 Primäre Zielparameter - Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht	39
5.1.1 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	40
5.1.2 Einfluss der Händigkeit auf geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen.....	42
5.2 Sekundäre Zielparameter - Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit.....	46
5.2.1 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit..	47
5.2.2 Einfluss des Geschlechts auf händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen.....	49
5.3 Sekundäre Zielparameter - Die nonverbale Intelligenz in Abhängigkeit von Geschlecht und Händigkeit.....	53
6 Diskussion.....	55
6.1 Bedeutung der Ergebnisse für die Medizin	55
6.2 Einschätzung der Ergebnisse im Vergleich zu Daten aus der Literatur	57
6.2.1 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht	57
6.2.2 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht unter Berücksichtigung der Händigkeit.....	60
6.2.3 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit.....	61
6.2.4 Weitere Aspekte der interhemisphärischen EEG-Kohärenzen unter Berücksichtigung der nonverbalen Testwerte	63
6.3 Kritische Bemerkungen zu den angewandten Methoden und einige Ausblicke für die zukünftige Forschung.....	66
6.4 Schlussfolgerung	68
7 Zusammenfassung.....	70
8 Literaturverzeichnis.....	71
9 Danksagung.....	85
10 Lebenslauf.....	86
11 Erklärung.....	87

1 Einführung

„Erkenne Dich selbst!“ – Diese von den Griechen aus der Antike stammende Maxime ist heute noch immer aktuell. Das Streben nach Selbsterkenntnis und Selbstverständnis muss nicht immer heilsam sein. Jedoch steht außer Frage, dass die meisten Menschen großes Interesse daran haben, sich selbst und ihre Persönlichkeit sowie die daraus erwachsenden Handlungsweisen zu verstehen. Diese dem Menschen ureigene Neugier trug grundlegend dazu bei, sich der Erforschung des Gehirns zuzuwenden. Schließlich schreiben wir heute diesem Organ die Entstehung des menschlichen Bewusstseins, des Denkens und der Wahrnehmung zu.

Die Sicht auf das Gehirn hat sich in der Geschichte der Menschheit stark gewandelt. Die Ägypter versuchten bereits vor 5000 Jahren, mittels Trepanationen Informationen über den Inhalt des Schädels zu erlangen. Während Aristoteles Empfindungen noch dem Herzen zuordnete und das Gehirn als bloßes Kühlaggregat des Körpers sah, hatte es zuvor bereits Hippokrates als Entstehungsort von grundlegenden Gefühlen und Empfindungen sowie als Sitz der Intelligenz verstanden. Im 17. Jahrhundert wurde die Hirnforschung stark von Descartes beeinflusst, welcher die strikte Zweiteilung von Körper und Seele postulierte. Dieser Cartesianische Dualismus wirkt sich bis heute auf die Neurowissenschaften aus. Er entspricht nicht nur dem Verständnis des Laien, selbst Forscher haben zuweilen Schwierigkeiten, sich von den tief verwurzelten cartesianischen Intuitionen zu befreien.

Die Entwicklung des Homunculus im 19. Jahrhundert stützte sich auf die Zuordnung verschiedener Gehirnregionen zu sensorischen und motorischen Körperfunktionen. Erste kartographische Zuordnungen der Großhirnrinde zu entsprechenden Arealen verdanken wir Vorreitern der Neuroanatomie wie Broca, Wernicke und Brodmann.

Richard Caton gelang es im Jahre 1875 in London erstmals, die Hirnstromwellen von Säugetieren abzuleiten. In Ermangelung der heute üblichen Verstärkertechnik sollte es noch 50 Jahre dauern, bis Hans Berger im Jahre 1924 auch beim Menschen Hirnströme registrieren konnte. Seit 1935 ist das Elektroenzephalogramm (EEG) nicht mehr aus der klinischen Routinediagnostik wegzudenken. Es avancierte zu einer der wichtigsten diagnostischen Hilfsmittel diverser Disziplinen der Medizin und trug zu neuen Erkenntnissen der Hirnforschung grundlegend bei.

Noch immer bleiben viele Fragen zur Funktionsweise des gesunden Gehirns offen. Das dual aufgebaute Nervensystem des Menschen fasziniert Wissenschaftler seit langem. Die Idee der Lateralität beeinflusste viele Gebiete wie die Medizin, Psychologie, Linguistik, Philosophie, Computerwissenschaft, Anthropologie sowie Soziologie und übt auch auf die breite Masse eine große Faszination aus.

Kohärenzen sind ein quantitatives Maß der Phasenkorrelation zwischen zwei EEG-Signalen. Mittels EEG-Kohärenzen können funktionelle Beziehungen zwischen Hirnarealen und somit unterschiedliche Verarbeitungsprinzipien aufgedeckt werden, ohne invasiv in Hirnstrukturen einzudringen.

Untersuchungen in der Medizin werden häufig bevorzugt an männlichen Probanden durchgeführt, u.a. um mögliche negative Auswirkungen auf bestehende oder bevorstehende Schwangerschaften zu vermeiden. Außerdem werden mehrheitlich rechtshändige Individuen für Untersuchungen ausgewählt, beispielsweise um leichter homogene Gruppen zu erhalten. Die erzielten Untersuchungsergebnisse werden dann jedoch oft auf die Gesamtpopulation verallgemeinert.

Die vorliegende Studie soll daher einen Beitrag leisten, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen - wie Männern und Frauen sowie Linkshändern und Rechtshändern - aufzuzeigen. Es wird postuliert, dass sich diese in ihren kognitiven Leistungen und Lösungsstrategien voneinander unterscheiden. So wird angenommen, dass Frauen die interhemisphärischen Verbindungen stärker nutzen als Männer. Dies sollte sich in höheren interhemisphärischen Kohärenzen bei den Frauen niederschlagen. Auch die interhemisphärischen Kohärenzen bei Linkshändern und Rechtshändern sollen betrachtet werden. Sollten sich hierbei Unterschiede ergeben, wäre dies ein Argument für eine in Zukunft veränderte Auswahl von Probanden, wenn von diesen auf die gesamte Population geschlossen werden soll. Zudem könnte das Wissen über händigkeits- und geschlechtsabhängige Unterschiede beim Gesunden einen wichtigen Beitrag leisten. Auf solchen Grundlagen bauen letztendlich zukünftige Studien auf, welche Kohärenzänderungen bei diversen Krankheitsbildern bzw. deren Früherkennung zum Thema machen.

2 Einleitung

2.1 Grundlagen zur Lateralität

2.1.1 Hemisphärische Asymmetrie

Das Großhirn ist der am weitesten differenzierte Teil des Zentralnervensystems. Hier manifestiert sich die Besonderheit des Menschen im Denken, Fühlen und Handeln. Entwicklungsgeschichtlich hat das Großhirn das Telencephalon überwachsen und liegt der knöchernen vorderen und mittleren Schädelgrube auf. Es lässt sich äußerlich in zwei Hemisphären gliedern, welche durch die Fissura longitudinalis cerebri getrennt werden und sich wiederum jeweils aus vier Lappen zusammensetzen. Diese sind gemäß ihrer Lage benannt: Frontallappen, Parietallappen, Temporallappen und Okzipitallappen.

Man spricht von der so genannten Hemisphärenspezialisierung, da bestimmte Kortexareale Spezialaufgaben besitzen, welche bevorzugt in einer Hemisphäre vorkommen. Hierzu gehören beispielsweise motorische und sensorische Sprachzentren. Bereits Thatcher et al. (1986) nahmen einen höheren Grad der Differenzierung sowie der Kurzstrecken-Interaktionen der linken Hemisphäre an, während die rechte Hemisphäre eher lange Axone für den Informationsaustausch benötige. Zerebrale Asymmetrien zeigen sich schon beim Fötus. Sie sollen durch Gene, Testosteron oder beide Faktoren beeinflusst werden (Annett, 1991; Geschwind und Galaburda, 1985).

Die Hemisphären unterscheiden sich in den kognitiven Verarbeitungsstrategien. Korrelat hierfür sind die Händigkeit und Lösungsstrategien spezieller Probleme. Klassischerweise werden beim Rechtshänder der linken Hemisphäre verbale, analytische, rationale und „bewusste“ Verarbeitungsstrategien zugeordnet, der rechten Hemisphäre hingegen räumliche, kreative, intuitive und „unbewusste“. Beim Linkshänder lässt sich dies jedoch nicht einfach spiegelverkehrt wieder finden. So korreliert die Händigkeit bei Rechtshändern gut mit der hemisphärischen Spezialisierung für Sprache, nicht jedoch bei Linkshändern (Klar, 1999). Eine signifikante Asymmetrie der Hemisphären zugunsten der linken fand sich für Rechtshänder (N=15) beim präzentralen Sulcus im Gebiet der motorischen Handsteuerung. Für Linkshänder (N=15) fand sich keine solche Asymmetrie (Foundas et al., 1998). Offen bleibt die

Frage, ob diese Unterschiede in der Asymmetrie zur Bevorzugung einer Hand führen oder umgekehrt.

Frauen und linkshändige Männer sollen stärker entwickelte rechte Hemisphären besitzen als rechtshändige Männer (Witelson, 1989). Amunts et al. (2000) fanden bei Frauen keine Asymmetrie der beiden Hemisphären. Jedoch zeigten sich bei ausgeprägt rechtshändigen Männern signifikant tiefere zentrale Sulci der linken Hemisphäre im Vergleich zur rechten. Diese anatomischen Asymmetrien nahmen bei den Männern von starken Rechtshändern über Beidhänder zu den Linkshändern hin ab. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde postuliert, dass anatomische Asymmetrien bei Männern mit der Händigkeit assoziiert seien. Eine Geschlechtsabhängigkeit der kortikalen Organisation von Händigkeit erschien somit wahrscheinlich (Amunts et al., 2000). Anhand eines Fragebogens fanden Nalcaci et al. (2001) eine tendenziell größere Asymmetrie motorischer Funktionen bei rechtshändigen Frauen als bei rechtshändigen Männern.

Noch immer haben wir keine befriedigende Antwort auf eine Frage, die Young schon 1962 stellte: „Warum haben wir zwei Gehirne?“. Ein gekreuztes Nervensystem mit einem hemisphärischen Aufbau des Neocortex ist ein spezielles Phänomen beim Menschen, genauso wie Sprache, Werkzeuggebrauch und der aufrechte Gang. Viele Errungenschaften des Menschen wurden erst durch die laterale Spezialisierung des Zentralnervensystems ermöglicht. Besonders die dem Menschen ureigene Sprachfähigkeit wird häufig mit zerebraler Lateralisation in Zusammenhang gebracht und darüber auch mit der Händigkeit (Corballis, 2003).

In einem Modell wird die Existenz eines Chromosoms angeführt, das durch nicht-randomale Teilung der „Watson und Crick“-Stränge die hemisphärische Lateralisation verursachen soll (Klar, 1999). Ein RGHT-Gen (für *right=rechts*) soll für die Verteilung der DNA-Ketten auf die spezifischen Hemisphären verantwortlich sein. Darauf basierend wird postuliert, dass dominant familiär vererbte Schizophrenien und bipolare Störungen das Resultat chromosomal bedingter Fehlanordnungen von Kortexstrukturen seien. Psychotische Störungen sollen diesem Modell zufolge durch Störungen in der Entwicklung der zerebralen Asymmetrie zustande kommen (Klar, 1999).

2.1.2 Die Händigkeit als herausragendes Asymmetriemerkmal

Als bekanntestes und auffälligstes Asymmetriemerkmal des Menschen gilt die Händigkeit. Es besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Händigkeit und dem Ausmaß der funktionellen kortikalen Lateralisation motorischer Zentren (Dassonville et al., 1997).

Während sich bei den nichthumanen Primaten der bevorzugte Gebrauch einer Hand in etwa gleich verteilt, findet sich beim Menschen mit 85-95 % eine überwiegende Bevorzugung der rechten Hand (Reiss et al., 1999). Linkshändigkeit hingegen tritt abhängig von Alter und geographischer Lage nur in 5-15 % auf (O'Callaghan et al., 1993; Reiss, 2002).

Die unterschiedliche Verteilung der Händigkeit sowie ihr nahezu unverändertes Auftreten seit Menschheitsbeginn führten zu zahlreichen Theorien ihres Ursprunges.

Umwelteinflüsse: Harris (1990) erkannte einen kulturellen Einfluss in der Tatsache, dass in Ländern wie Japan, Deutschland und islamistisch geprägten Staaten, in denen ein gesellschaftlicher Druck zur Rechtshändigkeit besteht, die Präferenz der linken Hand mit 1-6 % gering ausfällt. In Ländern wie Kanada, den USA, Neuseeland oder Schweden, in denen dieser Druck weniger vorherrscht, kommt eine Präferenz der linken Hand mit 9-12 % häufiger vor. Dieser kulturelle oder auch umweltbedingte Druck zur Präferenz der rechten Hand könnte sich im Laufe der Menschheitsgeschichte verändert haben. Darauf weisen Vergleiche von prähistorischen Handabdrücken in Höhlen mit heutigen Daten hin, welche vermuten lassen, dass die Linkshändigkeit über die Jahrtausende beim Menschen anteilmäßig leicht abgenommen hat. Faurie und Raymond (2004) konnten in ebenfalls auf Handabdrücken in Höhlen basierenden Datenauswertungen hingegen keine signifikanten Unterschiede der Linkshänderanteile über mehr als 10000 Jahre finden.

Als erwiesen gilt, dass der gesellschaftliche Druck dazu führt, dass ursprünglich linkshändige Individuen mit zunehmendem Alter immer mehr zum Gebrauch der rechten Hand bei verschiedenen Tätigkeiten, insbesondere beim Schreiben, tendieren (Galobardes et al., 1999).

Genetische Theorien: Genetische Theorien zur Händigkeit basieren vorwiegend auf Familienuntersuchungen. Hierbei existieren unterschiedliche Modelle, welche teilweise

vom einfachen Erbmodus abweichen (Annett, 1885; McManus, 1991; Yeo und Gangestad, 1993).

Die Zwillingsforschung zeigte, dass sowohl unter den eineiigen als auch unter den zweieiigen Zwillingen beinahe zweimal so viele Linkshänder vorkommen wie normalerweise zu erwarten wäre (Geschwind und Galaburda, 1985; Reiss, 1996; Lewis et al., 1989).

Die bekanntesten genetischen Modelle zur Erklärung der Händigkeit, welche auch erfolgreich die Daten aus Familien- und Zwillingsuntersuchungen erklären können, sind die Modelle von Annett und McManus.

Bei der Überprüfung von Daten fiel Marian Annett folgendes Phänomen auf (Annett, 1985): Im Tierreich ist die „Händigkeit“ (Bevorzugung einer Pfote) entsprechend einer Gaußschen Glockenkurve verteilt, wobei Beidhändigkeit in 50% und Links- oder Rechtshändigkeit in je 25% der Fälle vorkommen. Die Verteilung der Händigkeit beim Menschen zeigt im Vergleich dazu eine nach rechts verschobene Gaußsche Kurve.

In der bekannten und oft zitierten Right-Shift-Theory postulierte Annett die Existenz eines Right-Shift-Gens (RS+), welches systematisch auf die menschlichen Asymmetrien Einfluss nehme, indem es die Entwicklung sprachrelevanter Mechanismen in der rechten Hemisphäre hemme und die linke Hand schwäche (Annett, 1985). Annetts Modell und seine späteren Modifikationen kommen nahe an die tatsächliche Verteilung der Händigkeit in der Bevölkerung heran (Annett, 1996).

Phänotypische Grundlage dieses genetischen Modells ist ein unimodales Kontinuum mit fließendem Übergang zwischen den Händigkeitspolen. Es gebe kein Gen, welches direkt die Händigkeit festlege. Stattdessen nehme das Right-Shift-Gen Einfluss auf die zerebrale Dominanz der linken Hemisphäre. Sei diese Hemisphäre dominant, steige die Wahrscheinlichkeit, dass die rechte Hand geschickter sei als die linke. Bei Abwesenheit des Right-Shift-Gens gebe es keine dominante Hemisphäre, und sowohl Sprache als auch Händigkeit verteilten sich zufällig und voneinander unabhängig auf die beiden Hemisphären. Somit werde auch die Rechts- bzw. Linkshändigkeit zufällig zu je 50% verteilt. Insgesamt nehme beim Menschen die Wahrscheinlichkeit zur Rechtshändigkeit und zu linksseitig repräsentierten Sprachfunktionen im Vergleich zu der rein zufällig verteilten Präferenz der Pfoten im Tierreich um genau eine Standardabweichung zu. Das Right-Shift-Gen führe also zu einer systematischen Richtungsverschiebung der Händigkeits-Verteilungskurve nach rechts. Diese Rechtsverschiebung sei für Homozygote (RS+RS+) größer als für Heterozygote (RS+RS-) und fehle bei

Abwesenheit des Right-Shift-Gens (RS-RS-). In der Bevölkerung müssten jeweils 25 % homozygot (RS+RS+ oder RS-RS-) und 50 % heterozygot (RS+RS-) sein. Da sich bei den 25 % RS-RS- keine Rechtsverschiebung ergibt, sollten durch die zufällige Verteilung 50 % von ihnen linkshändig sein. Diese Gruppe (12,5 %) soll nun wiederum Umwelteinflüssen unterliegen.

Das Modell von McManus unterscheidet sich im Konzept des Phänotyps der Händigkeit von Annetts Modell. Während Annett von einem unimodalen Kontinuum ausgeht, postuliert McManus zwei unterschiedliche Kategorien der Händigkeit. Das von McManus entwickelte Modell geht von einem die Händigkeit beeinflussenden Polymorphismus aus. Phänotyp I entspricht hierbei reinen Rechts- oder Linkshändern, Phänotyp II beschreibt die verschiedenen Übergangsformen dazwischen. Es werden zwei unterschiedliche Allele postuliert. Das D-Allel (für *Dexter*) führe in homozygoter Form zur Rechtshändigkeit, während das C-Allel (für *Chance*) zu einer zufälligen Verteilung der Händigkeit führe. Ein Individuum, bei dem zwei D-Allele vorliegen, werde somit zu 100 % die rechte Hand bevorzugen. Individuen mit einem C-Allel (zu 75 % rechtshändig) oder zwei C-Allelen (zu 50 % rechtshändig) würden demnach mit zunehmender Wahrscheinlichkeit die linke Hand bevorzugen (McManus, 1991). Auch McManus räumt einen zusätzlichen Einfluss der Umwelt ein.

Crow postulierte einen Zusammenhang zwischen geschlechtsbestimmenden Chromosomen (XY) und der kortikalen Lateralisation. Auf menschlichen X- und Y-Chromosomen wurde eine Region nachgewiesen, die bei anderen Primaten nur auf dem X-Chromosom vorhanden ist und durch Translokation entstanden sein soll. Innerhalb dieser homologen Region wurde ein Gen (ProtocadherinXY) beschrieben, das zur Klasse der Zell-Adhäsions-Moleküle gerechnet wird. Diese sind wiederum für die Zell-Migration im Großhirn wichtig. Somit wurde ProtocadherinXY als eine mögliche Ursache für die zerebrale Asymmetrie und damit zusammenhängend für die menschliche Sprachfähigkeit sowie für die Variabilität der Händigkeit angesehen (Crow, 2002).

Traumatheorie: Der hohe Anteil der Linkshänder bei Zwillingen ließe sich auch mittels der allgemeinen Traumatheorie (Geburtsstress, Sauerstoffmangel) erklären (Segal, 1989; Smith, 2002). Dies deckt sich jedoch nicht mit den Ergebnissen vieler Familienuntersuchungen. Die so genannte pathologische Linkshändigkeit (Rechtshänder, welche durch ein frühes Trauma der linken Hemisphäre zu Linkshändern werden), soll laut McManus (1983) selten vorkommen. Jedoch konnte

wiederholt nachgewiesen werden, dass nach leichten prä- und postnatalen zerebralen Schädigungen gehäuft Linkshändigkeit auftrat (Kieler et al., 2001; O'Callaghan et al., 1993). Da heute immer mehr Kinder ein Geburtstrauma überleben, der Anteil der Linkshänder jedoch konstant bleibt, reicht die Traumatheorie allein jedenfalls nicht für die Erklärung der Linkshändigkeit aus. Auch Reiss (2002) stellte fest, dass es keine sichere Evidenz für Linkshändigkeit als pathologisches Zeichen gebe.

Weitere Erklärungsansätze: Mulligan et al. (2001) vermuteten eine Beteiligung von Wachstumshormonen an der hemisphärischen Lateralität und der kognitiven Entwicklung.

Eine allseitig umfassende Erklärung sämtlicher Aspekte der Händigkeit liegt bislang nicht vor. Es gilt jedoch als gesichert, dass die Händigkeit ein Ausdruck hemisphärischer Asymmetrie ist und dass sie mit anderen hemisphärischen Asymmetrien, besonders mit der Lateralisation der Sprache, zusammenhängt (Foundas et al., 2002). Wie dopplersonographische Untersuchungen belegen, steigt die Häufigkeit der rechtshemisphärischen Sprachdominanz linear mit der Linkshändigkeit an und beträgt 4 % bei ausgeprägten Rechtshändern, 15 % bei Beidhändern und 27 % bei ausgeprägten Linkshändern (Knecht et al., 2000). Darüber hinaus zeigten emissionstomographische Untersuchungen, dass es bei umgeschulten Linkshändern beim rechtshändigen Schreiben zu einer Aktivierung sowohl links- als auch rechtshemisphärischer Sprachregionen kam, während bei Rechtshändern lediglich eine linksseitige Aktivierung nachzuweisen war (Siebner et al., 2002). Dies belegt einen die Umschulung überdauernden Unterschied in den hemisphärischen Asymmetrien zwischen Links- und Rechtshändern.

Begabung und Fähigkeiten: Die unterschiedlichen hemisphärischen Asymmetrien von Links- und Rechtshändern scheinen auch mit unterschiedlichen Begabungen und Fähigkeiten verknüpft zu sein. Levy publizierte bereits 1969 Untersuchungen, denen zufolge Linkshänder Rechtshändern in nonverbalen Leistungen unterlegen seien. Diesen Untersuchungen lag jedoch nur eine geringe Stichprobe von 25 Probanden zugrunde. Es folgte eine Reihe von Publikationen, welche auf eine Korrelation zwischen den kognitiven Fähigkeiten und der Händigkeit abzielten. Durch Geschicklichkeitsuntersuchungen beider Hände und die Beurteilung kognitiver Fähigkeiten fand Marian Annett heraus, dass räumlich-mathematische Begabungen vorrangig mit der Geschicklichkeit der linken Hand korrelierten und dass Linkshänder

sowie weniger stark ausgeprägte Rechtshänder in diesen Fähigkeiten besser abschnitten als ausgeprägte Rechtshänder (Annett; 1985, 1992 und 1993).

Annetts Publikationen fanden international große Beachtung. Die kritische Auseinandersetzung mit den Veröffentlichungen führte zu unterschiedlichen Ergebnissen (McManus et al., 1993). Die als Versuch einer Replikation von Annetts Postulationen angelegte Studie von Strehlow et al. (1996) konnte Annetts Ergebnisse nicht gänzlich reproduzieren. Es ergaben sich geringfügig niedrigere nonverbale Intelligenzwerte im Falle ausgeprägter Händigkeit (egal, ob es sich um ausgeprägte Links- oder um ausgeprägte Rechtshändigkeit handelte) verglichen mit beidhändigen Probanden. Der in Annetts Arbeiten angeführte Abfall der nonverbalen Intelligenzwerte von extremer Linkshändigkeit über Beidhändigkeit zu extremer Rechtshändigkeit (Annett, 1992) war jedoch nicht nachweisbar.

Whittington et al. (1991) fanden bei Rechtshändern geringfügig schlechtere Ergebnisse in mathematischen Leistungen, als im Vergleich zum allgemeinen Intelligenzniveau dieser Probanden zu erwarten gewesen wäre. Linkshänder hingegen wiesen vergleichsweise bessere mathematische Leistungen als erwartet auf. Dieses Ergebnis könnte die Hypothese stützen, dass starke Rechtshändigkeit nachteilig für die nonverbale Intelligenz sei.

Insgesamt wurden die von Annett postulierten Zusammenhänge zwischen Händigkeit und Intelligenz nicht immer bestätigt. Eine Rolle hierfür spielen Unterschiede bei der jeweiligen Definition der Händigkeit, da in einigen Studien die Handpräferenz und in anderen die Handgeschicklichkeit untersucht wurde.

Geschwind und Galaburda (1985) postulierten für Linkshänder aufgrund der bei ihnen stärker entwickelten rechten Hemisphäre bessere Leistungen in Funktionen, welche überwiegend von der rechten Hemisphäre kontrolliert werden. Dazu gehören räumliches Vorstellungsvermögen, Kreativität, Musikalität und sportliche Aktivitäten. Verschiedene Studien konnten einen größeren Anteil von Linkshändern unter Sportlern (Holtzen, 2000), Musikern (Christman, 1993), Schachspielern (Cranberg, 1988), Architekten (Göttestam, 1990) und Mathematikern (Annett, 1990; O'Boyle und Benbow, 1990) nachweisen. Andererseits sollen Linkshänder unter Chirurgen (Schott, 1995) und Mikrobiologen (Fry, 1990) unterrepräsentiert sein, während unter Zahnärzten vermehrt Beidhänder gefunden wurden (Henderson, 1996). Martino (1995) wies bei Linkshändern schlechtere verbale Leistungen nach.

Die individuellen kognitiven Fähigkeiten sollen innerhalb der Gruppe der Linkshänder stärker als bei den Rechtshändern variieren. Unter den Linkshändern finden sich sowohl mehr Minderbegabte als auch mehr überdurchschnittlich Begabte (Noroozian et al., 2002). Ersteres ließe sich durch die vermehrt in Hilfsschulen, unter Epilepsiekranken und bei Patienten mit mentaler Retardierung sowie Down Syndrom auftretende Gruppe der bereits erwähnten so genannten pathologischen Linkshänder (Pipe, 1987) erklären. Auf der anderen Seite postulierten Geschwind und Galaburda (1985) sowie Christman (2001) eine stärkere Entwicklung der rechten Hemisphäre als Ursache für Linkshänder mit überdurchschnittlichen Leistungen in räumlich-visuellen, mathematischen und künstlerischen Bereichen. O'Boyle und Benbow (1990 und 1994) bestätigten, dass bei mathematisch begabten Jugendlichen die rechte Hemisphäre führend in der Informationsverarbeitung sei.

Bei der Ermittlung des Intelligenzquotienten anhand des Wechsler-Intelligenz-Tests für Erwachsene konnten Portellano et al. (2006) jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Links- und Rechtshändern (je N=25) ausmachen.

Coren (1995) fand bei seinen (ausschließlich männlichen) Probanden bei den Linkshändern höhere Werte in neuen und unkonventionellen Denkstrategien, während Rechtshänder eher auf konventionelle Denkstrategien zurückgriffen. Die linkshändigen Männer zeigten also eine Überlegenheit im so genannten „divergenten Denken“, welches die Entwicklung neuer Ideen, das Durchbrechen althergebrachter Denkschemata und eine weit reichende Berücksichtigung alternativer Lösungsmöglichkeiten bei komplexen Aufgaben beinhaltet. Niebauer (2004) postulierte hingegen eine Assoziation von ausgeprägter Händigkeit *per se* (Rechts- oder Links-) mit „Rumination“ im Sinne wiederkehrender Gedankeninhalte und Festhalten an gewohnten Denkstrukturen. Beidhändigkeit hingegen sei mit höherer Selbstreflexion im Sinne veränderbarer Denkansätze assoziiert.

Störungsbilder: Insgesamt sollen Linkshänder ein weniger lateralisiertes Gehirn besitzen als Rechtshänder. Ein Zusammenhang mit dem gehäuftem Auftreten bestimmter Krankheiten bei Linkshändern bleibt fraglich. Beispielhaft genannt seien hier die Lese-Rechtschreib-Schwäche und das Stottern (Annett, 1996; Geschwind und Galaburda, 1985), die Schizophrenie (Sommer et al., 2001; White et al., 1988) sowie autoimmunologische Erkrankungen wie das Asthma und die entzündlichen Darmerkrankungen (Bryden et al., 1994; Geschwind und Galaburda, 1985; Morfit und Weekes, 2001). Dieses Zusammentreffen von Krankheit und Linkshändigkeit muss

nicht notwendigerweise mit der Händigkeit als einzelнем Merkmal zusammenhängen, sondern könnte eine gemeinsame Charakteristik der Kortexorganisation sein. Die Variation eines Genabschnittes (ProtocadherinXY, s.o.), welcher die hemisphärische Asymmetrie beeinflusst, soll sowohl psychotische Störungen als auch die Linkshändigkeit begünstigen (Crow, 1999 und 2000).

2.1.3 Geschlecht und hemisphärische Lateralität

Es ist bekannt, dass sich unter Männern etwas häufiger Linkshänder finden als unter Frauen. Demura et al. (2006) ermittelten anhand eines Händigkeits-Fragebogens nach Oldfield (1971) den Lateralitätsquotienten (LQ) und verglichen diesen mit der subjektiv als dominant empfundenen Hand. Dabei ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Subjektive Linkshändigkeit fand sich bei 6,5 % der Männer und nur 3,2 % der Frauen, LQ-basierte Linkshändigkeit bei 5,2 % der Männer und nur 2,1 % der Frauen. Diese Ergebnisse bestätigten frühere Befunde von durchschnittlich 4,03 % Linkshändern bei Männern im Vergleich zu nur 2,36 % Linkshändern bei Frauen (Shimizu und Endo, 1983).

Erklärungsansätze: Männliche Föten weisen einen höheren Testosteronspiegel auf. Auf dieser Grundlage postulierten Geschwind und Galaburda (1985), dass ein erhöhter pränataler Testosteronspiegel das Wachstum der linken Hemisphäre beeinträchtigt, zugleich die Entwicklung der korrespondierenden Gebiete der rechten Hemisphäre begünstigt, und somit zur Linkshändigkeit bzw. Nicht-Rechtshändigkeit führe. Tan und Tan (2001) konnten einen Zusammenhang des pränatalen Testosterons mit einer zerebralen Lateralisation bestätigen. Anhand dieser Hypothese ist es jedoch nur teilweise möglich, die Linkshändigkeit bei Männern zu erklären, da der Anteil der linkshändigen Männer nur geringfügig höher ist als der Anteil der linkshändigen Frauen. Laut Laval et al. (1998) sei innerhalb untersuchter Familien eine Assoziation zwischen den gemeinsamen Allelen der X-Chromosomen und dem Geschlecht einerseits sowie der Ausprägung der Linkshändigkeit andererseits erkennbar.

Zappasodi et al. (2006) postulierten aufgrund magnetenzephalographischer Untersuchungen des Großhirns Frequenzunterschiede in Abhängigkeit vom Geschlecht (höhere Alpha-Frequenz bei Frauen) und vom Alter (niedrigere Alpha-Frequenzen bei älteren Probanden). Da diese Effekte symmetrisch in beiden Hemisphären zu finden

waren, ergaben sich keine interhemisphärischen Differenzen in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter.

Haut und Barch (2006) fanden keine konsistenten Hinweise auf Unterschiede in der kortikalen Lateralisation zwischen Männern und Frauen. Beide Geschlechter zeigten eine starke und überdauernde aufgabenabhängige Lateralisation des Arbeits- und episodischen Gedächtnisses. Dabei führten verbale Aufgaben zu stärkerer linkseitiger Aktivierung, nonverbale Aufgaben zu stärkerer rechtsseitiger Aktivierung der Hemisphären.

Bereits 1985 ergaben Untersuchungen von Pizamiglio und Mammucari Hinweise für die Bedeutung des Geschlechts bei der hemisphärischen Lateralisation der Sprache. Während Grammatik und Sprachmotorik bei Männern überwiegend von der linken Hemisphäre gesteuert werden, findet sich bei Frauen eine eher bilaterale hemisphärische Kontrolle (Coney, 2002; Walla et al., 2001).

Begabung und Fähigkeiten: Die unterschiedlichen hemisphärischen Asymmetrien der Geschlechter sind wiederum mit unterschiedlichen Fähigkeiten verknüpft (Pogun, 2001), wobei Männer tendenziell bei räumlich visuellen Aufgabenstellungen besser abschnitten als Frauen (Crucian et al., 1998; Roberts et al., 2000).

Unter mathematisch begabten Jugendlichen fanden sich überdurchschnittlich viele Jungen im Vergleich zu Mädchen (Benbow, 1988). In sprachlichen Funktionen hingegen sollen eher Frauen überlegen sein (Russo et al., 2000).

Für die geschlechtsabhängigen funktionellen hemisphärischen Asymmetrien werden auch die monatlichen zyklischen sowie circadianen hormonellen Schwankungen verantwortlich gemacht (Alexander et al., 2002; Hausmann et al., 2000; Sanders et al., 2002).

Störungsbilder: Geschlechtsunterschiede sollen auch für die Häufigkeit des Auftretens spezieller Erkrankungen eine Rolle spielen, die mit zerebraler Lateralisation in Zusammenhang gebracht werden. Dies wurde dann zum Teil auf die unterschiedliche hemisphärische Lateralisation bei Männern und Frauen zurückgeführt. Störungen der Sprachmotorik und Sprachverarbeitung wie das Stottern und die Lese-Rechtschreibschwäche fanden sich beispielsweise gehäuft beim männlichen Geschlecht (Flannery et al., 2000; Drayna et al., 1999; Geschwind und Galaburda, 1985).

2.1.4 Interhemisphärische Verbindung

Zweifelsohne war die Lateralität ein Adaptationsmechanismus, der jedoch nicht nur Vorteile mit sich brachte. Auch den Verbindungsmechanismen der beiden Hemisphären wird eine große funktionelle Bedeutung beigemessen (Beaumont, 1997).

Kommissurenfasern verbinden Areale der beiden Hemisphären miteinander. Sie verlaufen zum großen Teil im Corpus Callosum (Balken). Dieses besteht aus mehreren Abschnitten und bildet mit seinen quer verlaufenden Fasern das Dach der Seitenventrikel, wobei es beinahe alle Teile der Hemisphären miteinander verbindet. Der menschliche Balken führt etwa 200 Millionen myelinisierte und unmyelinisierte Axone.

Das Kommissurensystem des Balkens ist hinsichtlich der funktionellen Spaltung des Großhirns bedeutsam. Es ermöglicht im Sinne einer sekundären Integration die Kommunikation der rezeptiven und motorischen Zentren beider Hemisphären (Trepel, 1999). Sowohl die Größe des Corpus Callosum als auch der Grad der Myelinisierung der durchziehenden axonalen Verbindungen verändern sich postnatal. Es wird angenommen, dass diese interhemisphärische Verbindung eines der sich am längsten entwickelnden neuronalen Netzwerke des menschlichen Gehirns ist. Die Entwicklung soll bis zum frühen Erwachsenenalter fortschreiten (Pujol et al., 1993; Giedd et al, 1996).

Die unterschiedlich ausgeprägte Lateralisation der Hemisphären wird durch das Corpus Callosum teilweise ausgeglichen. Es verbindet lateralisierte und nicht-lateralisierte Module miteinander. Seine Zerstörung unterbricht den interhemisphärischen Datentransfer. Daraus resultieren beispielsweise eine herabgesetzte Aufmerksamkeit sowie Schwierigkeiten beim Erlernen neuer bimanueller Fertigkeiten (Wong, 2000).

Auf einen Zusammenhang zwischen Lateralisation und interhemisphärischer Kommunikation wiesen auch Untersuchungen von Moffat et al. (1998) hin. Mittels Magnetresonanztomographie wurde bei den (allerdings ausschließlich männlichen) Probanden ein größeres Corpus Callosum für Linkshänder mit linkshemisphärischer Sprachfunktion als für Linkshänder mit rechtshemisphärischer Sprachfunktion oder für Rechtshänder mit linkshemisphärischer Sprachfunktion nachgewiesen. Es wurde geschlussfolgert, dass eine erhöhte interhemisphärische Kommunikation nötig sein könnte, wenn die neuronalen Systeme, welche der Sprache und der Händigkeit zugrunde liegen, nicht in derselben Hemisphäre angesiedelt sind.

In Abhängigkeit vom Geschlecht wurden Unterschiede in der Größe und Oberflächenbeschaffenheit des Corpus Callosum gefunden (Luders et al., 2006). Diese können jedoch auf einen generellen Größenunterschied des Gehirns bei Männern im Vergleich zu Frauen zurückgeführt werden. Es sei kein signifikanter Unterschied in der Größe des Corpus Callosum zwischen Männern und Frauen zu finden, wenn die Daten in Abhängigkeit von der Kopfgröße skaliert werden (Luders et al., 2006).

Auch für die Händigkeit konnte keine signifikante Assoziation mit der Balkengröße nachgewiesen werden (Luders et al., 2003). Es fanden sich jedoch einige Anhaltspunkte für effizientere interhemisphärische Verbindungen bei Linkshändern (Christman, 2001; Witelson, 1989).

Gorynia und Egenter (2000) fanden heraus, dass weniger stark ausgeprägte Linkshänder signifikant höhere Scores bei der intermanuellen Koordination aufwiesen, was ebenfalls als Ausdruck besserer interhemisphärischer Zusammenarbeit gewertet wurde.

2.2 Das Elektroenzephalogramm als nichtinvasive Messmethode

2.2.1 EEG - Grundlagen

Die Vorgänge im Großhirn sind Untersuchungen nur schwer zugänglich. Eine nichtinvasive Methode, im Kortex entstehende Makrorhythmen zu erfassen, ist das Elektroenzephalogramm (EEG). Dem EEG liegen vorwiegend postsynaptische Potentiale zugrunde. Mit Hilfe von Elektroden in standardisierter Anordnung werden solche Hirnstromwellen, also die bioelektrische Aktivität des Kortex, von der Kopfhaut abgeleitet. Die zwischen zwei Elektroden gemessene Potentialdifferenz wird verstärkt und aufgezeichnet. Zur Darstellung der Merkmale der zerebralen Aktivität werden die Elektroden nach dem bipolaren Prinzip (Serienschaltung von Elektroden in Längs- bzw. Querreihen) oder dem Referenzprinzip verschaltet.

Das Hirnstrombild zeigt überwiegend Wellen im Frequenzbereich von 1 bis 30 Hz. Die Unterteilung in Frequenzbereiche nach BERGER wird wie folgt vorgenommen: 14-30/sec (Beta); 8-13/sec (Alpha); 4-7/sec (Theta); 0,5-3/sec (Delta); <0,5/sec (Subdelta); >30/sec (Gamma).

Beim Gesunden findet man im wachen Zustand parieto-okzipital eine Alpha-Grundaktivität mit einer Spannung von etwa 50 Mikrovolt. Physiologisch ist dieser

Alpha-Rhythmus gut ausgeprägt, regelmäßig und spindelförmig. Er ist okzipital stark abhängig von der Vigilanz und unterliegt einem visuellen Blockierungseffekt (Öffnen der Augen). Über den vorderen Hirnabschnitten ist eine schnelle Aktivität im Beta-Bereich mit Einlagerung bzw. Unterlagerung langsamer Theta-Wellen zu beobachten. Langsame Delta- und Theta-Wellen finden sich physiologisch im Schlaf.

In niedrigen Frequenzbereichen ist bei der EEG-Ableitung mit einem vergleichsweise höheren Einfluss von Artefakten durch z.B. Puls und Augenbewegung zu rechnen. Hohe Frequenzbereiche werden durch Muskelbewegungen und Netzbrummen (>50 Hz) beeinflusst. Mittels sowohl visueller als auch softwaregesteuerter Kontrolle und Elimination der Muskel- und Augenbewegungs-Artefakte können diese Einflüsse gering gehalten werden. Durch Netzsperrfilter kann das Netzbrummen eliminiert werden.

Hirnschädigungen, neurologische, somatische und psychiatrische Erkrankungen sowie Intoxikationen führen zu Frequenz- und Amplitudenänderungen im EEG. Auch Provokationsmethoden wie Hyperventilation und Photostimulation können entsprechende Veränderungen bewirken (Masuhr und Neumann, 1996; Neundörfer, 2002).

2.2.2 EEG-Kohärenzen - Grundlagen

Die Kohärenz hat sich als wertvolles Werkzeug für die Erfassung funktioneller Beziehungen zwischen verschiedenen Orten des Kortex bewährt.

Eine Kohärenz wird zwischen zwei EEG-Signalen berechnet, welche zur gleichen Zeit an verschiedenen Orten der Kopfhaut abgeleitet werden (Shaw et al., 1978 und 1981). Sie lässt sich aufgrund von „Signal-Rausch-Verhältnissen“ beschreiben (Rappelsberger und Sühlfleisch, 2000). Hierbei bezieht sich der Terminus „Signal“ auf den kohärenten Signalanteil, den synchronisierte Zellen zweier neuronaler Verbände erzeugen. „Rauschen“ beschreibt den nicht kohärenten Signalanteil. Eine Änderung der Signalanteile aufgrund kognitiver Aktivitäten wird als Änderung der neuronalen Koppelung bewertet. Eine Kohärenz ist somit ein quantitatives Maß der Phasenkorrelation zwischen zwei Signalen (Nunez et al., 1997).

Ein Kohärenzwert nimmt immer einen Zahlenwert zwischen 0 und 1 an und entspricht einem Korrelationskoeffizienten pro Frequenz oder Frequenzband. Der Korrelationskoeffizient ist die Funktion der Phasenverschiebung zwischen den Signalen.

Er ist abhängig vom Muster der Oszillation zweier Signale über die einbezogenen Epochen, jedoch unabhängig von der Amplitude der Signale (Shaw, 1981).

Mathematisch lässt sich ein Korrelationskoeffizient zwischen zwei Signalen mithilfe der Kovarianz beider Signale sowie der Varianzen der zwei einzelnen Komponenten beschreiben. Hierbei wird die Varianz häufig als Leistung bezeichnet. Obwohl sich Kohärenz und Korrelation im mathematischen Detail unterscheiden, werden sie für praktische Zwecke als identisch angenommen (Shaw, 1981).

$G_{xy}(f)$ sei das Kreuzleistungsspektrum der EEG-Ableitung an den Elektroden x und y , $G_{xx}(f)$ und $G_{yy}(f)$ seien die EEG-Leistungsspektren der beiden Elektroden, f stehe für die Frequenz. Die Kohärenz kann dann wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Kohärenz} = [G_{xy}(f)]^2 / [G_{xx}(f) G_{yy}(f)]$$

Dementsprechend ist das Kohärenzspektrum die Normierung des Kreuzleistungsspektrums zweier Kanäle bzw. Elektrodenableitungen durch die zwei Autospektren (Tucker et al., 1986).

Die Berechnung der Korrelationsfunktion bzw. die spektrale Analyse für die Auto- und Kreuzspektren werden heute mittels der mathematischen Methode der Fourier-Transformation computergestützt vorgenommen (Shaw, 1983).

Mithilfe der Kohärenz lassen sich Phasenkopplungen innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes erfassen. Bei kognitivem Aufwand kommt es zu einer Synchronisation verschiedener Hirnareale (Sommerfeld et al., 1999), die durch eine Erhöhung der kognitiven Aktivitäten dieser Regionen bedingt ist. Somit kommt es zu einer Erhöhung des Kohärenzwertes.

Mit zunehmender Distanz der Elektrodenpaare zueinander sinkt der Kohärenzwert (French und Beaumont, 1984).

2.2.3 EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von Geschlecht, Händigkeit und Alter

Ausgehend von der Annahme, dass die Dichte der Axone (weiße Substanz) die Höhe der von der Kopfhaut abgeleiteten Kohärenzen direkt beeinflusst, sollen höhere intrahemisphärische Kohärenzen der rechten im Vergleich zur linken Hemisphäre mit einem höheren Anteil von weißer Substanz in der rechten Hemisphäre einhergehen (Gur et al., 1980; Thatcher et al., 1986; Amunts et al., 1997). Dagegen zeigte die stärker

von Fissuren durchzogene linke Hemisphäre mit einer höheren Densität an Zellen (graue Substanz) niedrigere intrahemisphärische Kohärenzen (Galaburda et al., 1978). Eine höhere Kohärenz weist somit auf eine vergleichsweise stärkere Faserkonnektivität zwischen den Arealen hin, was wiederum auf einen höheren Informationsaustausch schließen lässt. Schon Shaw (1981) erkannte hier einen Zusammenhang verschiedener Kohärenzmuster mit individuellen kognitiven Fähigkeiten und Strategien.

Interhemisphärische Kohärenzen sind abhängig von den die Hirnhälften verbindenden Strukturen. So wurden deutlich niedrigere interhemisphärische Kohärenzen in Frequenzbändern unter 4 Hz bei Kleinkindern ohne Corpus Callosum gefunden (Kuks et al., 1987).

Van Beijsterveldt et al. (1998) postulierten aufgrund von Untersuchungen an Zwillingspaaren einen hohen genetischen Einfluss auf die Kohärenzen. Sie fanden keine Hinweise auf einen deutlichen Einfluss von Umweltfaktoren auf die Variation der EEG-Kohärenzen. Die Korrelation der Kohärenzen erwies sich zwischen den monozygoten Zwillingen höher als zwischen den dizygoten Zwillingen. Die größten erblichen Einflüsse fanden sich im Alpha-Frequenzband bei kurzen Distanzen und fronto-frontalen Verbindungen.

Duffy et al. (1996) fanden höhere interhemisphärische Kohärenzen bei Frauen (N=200) gegenüber Männern (N=171). Bei einer kleineren Untergruppe (21 Linkshänder und 42 Rechtshänder) ergaben sich Geschlechts-und-Händigkeit-Interaktionen: Rechtshändige Frauen hatten höhere interhemisphärische Kohärenzen als rechtshändige Männer, hingegen hatten linkshändige Männer höhere interhemisphärische Kohärenzen als linkshändige Frauen.

Razumnikova und Vol'f (2006) fanden Geschlechtsunterschiede in den EEG-Kohärenzen während der Darbietung akustischer Reize. Wurde ein solcher Stimulus nur einem Ohr dargeboten, so stiegen die Kohärenzen interhemisphärisch im Theta-Frequenzband an, und zwar frontal bei Männern und parieto-okzipital bei Frauen.

Kohärenzen sind außerdem abhängig vom Alter. Sie nehmen bei Kindern und Jugendlichen mit steigendem Alter zu (Marosi et al., 1992). Dies wird auch von einer Studie an je 40 Mädchen und Jungen zwischen 8 und 12 Jahren gestützt, deren Ergebnisse auf eine systematische Entwicklung der EEG-Kohärenzen in dieser Altersgruppe hinweisen (Barry et al., 2004). Bei Kindern zwischen 7,6 und 13,3 Jahren waren bei den Mädchen die Kohärenzen rechtshemisphärisch wie auch interhemisphärisch in fast allen Frequenzbändern geringfügig höher (Marosi et al.,

1993). Van Beijsterveldt et al. (1998) fanden bei 16-jährigen Mädchen im Vergleich zu Jungen signifikant höhere Kohärenzen zwischen den meisten Elektrodenpaaren. Diese Befunde wurden auf eine unterschiedliche geschlechtsabhängige Gehirnentwicklung in den untersuchten Altersgruppen zurückgeführt.

Ford et al. postulierten 1986 eine Abnahme der EEG-Kohärenzen im späten Erwachsenenalter. Spätere Befunde an rechtshändigen Probanden bestätigten die Kohärenz-Abnahme mit zunehmendem Alter, besonders nach dem 50. Lebensjahr (Duffy et al., 1996). Diese Effekte werden zum großen Teil auf die Involution des Corpus Callosum im Alter zurückgeführt (Cowell et al., 1992). Jeeves und Moes (1996) fanden bei über 60-jährigen Probanden eine signifikante Zunahme der interhemisphärischen Transferzeit. Dieser Effekt wurde überwiegend durch die weibliche Gruppe hervorgerufen. Hingegen fanden sich keine signifikanten Geschlechtsunterschiede in der jungen Gruppe der 18- bis 30-jährigen.

2.2.4 EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von individuellen Fähigkeiten

Thatcher et al. postulierten bereits 1983 eine negative Beziehung zwischen Kohärenz und Intelligenz bei Kindern. Erhöhte intra- und interhemisphärische Kohärenzen waren demnach mit niedrigerer Intelligenz assoziiert. Diese Ergebnisse wurden als Relation von abnehmender Kohärenz zu zunehmender kortikaler Differenzierung bei neurologisch normalen Individuen interpretiert.

Dagegen wiesen diverse Autoren darauf hin, dass sowohl die verbale als auch die nonverbale Intelligenz mit der Effizienz des interhemisphärischen Transfers korreliert. Auf die Bedeutung des Corpus Callosum beim interhemisphärischen Informationstransfer wurde bereits eingegangen. Cook et al. (1990) gehen davon aus, dass die häufig reduzierte Intelligenz bei Patienten mit Agenesie des Corpus Callosum ursächlich auf einem verminderten interhemisphärischen Informationsaustausch beruhe. Jeret et al. (1987) stellten bei 85 % der Patienten ohne Corpus Callosum eine mentale Retardierung fest. Sie wiesen aber außerdem darauf hin, dass eine Agenesie des Balkens häufig mit anderen neurologischen Syndromen und morphologischen Abnormalitäten einhergeht. Somit müsse die Intelligenzminderung nicht unbedingt auf die Agenesie des Corpus Callosum an sich zurückzuführen sein.

Ferner gehen verschiedene Autoren davon aus, dass interhemisphärische Bahnen eine große Bedeutung für kognitive Strategien besitzen. Cook (1984) schreibt dem

interhemisphärischen Transfer sogar die Fähigkeit zu, verschiedene Sichtweisen auf ein Problem zu entwickeln. Eine positive Korrelation zwischen der Größe des Corpus Callosum und sowohl dem Gesamt-IQ als auch der nonverbalen Intelligenz wurde postuliert (Atkinson, 1996). Ein effizienter interhemisphärischer Informationstransfer scheint also für kognitive Leistungen grundsätzlich von Vorteil zu sein.

Der Vergleich von Individuen mit normaler Intelligenz zu solchen mit leichten kognitiven Defiziten zeigte bei letzteren allerdings signifikant höhere intra- und interhemisphärische EEG-Kohärenzen bei der Lösung von Gedächtnisaufgaben. In Ruhe hingegen fanden sich keine signifikanten Unterschiede. Die Erhöhung der Kohärenzwerte wurde als Kompensationsmechanismus gewertet (Jiang und Zheng, 2006).

2.2.5 EEG-Kohärenzen in der medizinischen Diagnostik

Kohärenzuntersuchungen wurden in verschiedenen Studien zur Merkmalsbestimmung bei Erkrankungen herangezogen.

Veränderte funktionelle Beziehungen zwischen Hirnregionen fanden sich bei psychotischen und schizophrenen Erkrankungen (Rappelsberger et al., 1993), Dyslexie und Hyperkinesie (French und Beaumont, 1984), affektiven Störungen, Alzheimer-Patienten (Pogarell et al., 2005) sowie unter neuroleptischer und trizyklischer Medikation (Ford, 1986).

Für die Psychiatrie spielen interhemisphärische EEG-Kohärenzen eine wichtige Rolle, da besonders für psychiatrische Krankheitsbilder Veränderungen in der hemisphärischen und interhemisphärischen Konnektivität angenommen werden. Ein Beispiel hierfür sind Untersuchungen von EEG-Kohärenzen im Zusammenhang mit der Schizophrenie (Mann et al., 1997). Eine Erhöhung der Kohärenzwerte schizophrener Patienten während produktiver Phasen der Erkrankung wurde als krankheitsbedingte Zunahme der Konnektivität zwischen den Hirnarealen interpretiert. Im Gegensatz dazu nehme die kortikale Konnektivität bei Residualzuständen der Schizophrenie tendenziell ab, was sich in niedrigeren Kohärenzwerten widerspiegelt.

Ebenso kann dauerhafter Einfluss oder Missbrauch von Drogen zu erhöhter kortikaler Konnektivität führen. Signifikante Erhöhungen der Kohärenzen, besonders der Alpha- und Theta-Frequenzbänder, wurden unter Cannabiseinfluss gefunden (Struve et al., 1998 und 1999).

3 Zielstellung

3.1 Beurteilung bisheriger Forschungsergebnisse und Konsequenzen für eine Aufgabenstellung

Beziehungen zwischen dem Geschlecht und speziellen kognitiven Fähigkeiten wurden in zahlreichen Arbeiten untersucht. Die postulierten Unterschiede in der kortikalen Lateralisation in Abhängigkeit vom Geschlecht waren nicht einheitlich, jedoch konnte für Frauen eine bessere interhemisphärische Faserkonnektivität aufgezeigt werden als für Männer. Untersuchungen, welche Unterschiede in den EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht bei gesunden Probanden zum Thema hatten, wurden bislang vor allem an Kindern und älteren Erwachsenen durchgeführt. Daher könnten diese Ergebnisse durch Entwicklungs- und Involutionsprozesse des Corpus Callosum beeinflusst worden sein.

Deutliche interhemisphärische Kohärenzunterschiede zwischen gesunden Männern und Frauen im jungen Erwachsenenalter, in welchem der Einfluss des Alters auf interhemisphärische Verbindungen gering ist, würden eine Grundlage für die Erkennung störungsbedingter Veränderungen schaffen und unser Wissen über geschlechtsabhängige zerebrale Verarbeitungsstrategien ergänzen.

Geschlechtsabhängige Unterschiede zeigen sich nicht nur in EEG-Kohärenzen, sondern in allen kognitiven Bereichen. Diese Unterschiede müssen deshalb immer berücksichtigt werden. Während beispielsweise in verbalen Fähigkeiten Frauen besser abschneiden, sollen in nonverbalen Leistungen die Männer den Frauen überlegen sein. Auch zwischen der Ausprägung der allgemeinen Intelligenz und den interhemisphärischen Kohärenzen soll ein Zusammenhang bestehen. Leider sind die Ergebnisse vorliegender Arbeiten sehr unterschiedlich, wobei Fallzahlen und Methoden deutlich variieren.

Als herausragendes Merkmal der hemisphärischen Lateralität wurde die Händigkeit oft zur Analyse kortikaler Veränderungen herangezogen. Die Auswirkung der Händigkeit auf die Höhe der EEG-Kohärenzen war ebenfalls Gegenstand vieler Arbeiten. Es wird vermutet, dass sowohl Linkshändigkeit als auch unkonventionelle Denkstrategien mit effizienteren interhemisphärischen Verbindungen einhergehen (s.o.). Leider liegen insgesamt nur wenige Arbeiten über interhemisphärische EEG-Kohärenzen bei

gesunden Probanden vor. Händigkeitabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen bei gesunden Probanden können als Voraussetzung für die Erkennung krankheitsbedingter Veränderungen dienen.

3.2 Entwicklung der Aufgabenstellung

Sowohl das Geschlecht als auch die Händigkeit sind mit unterschiedlichen hemisphärischen Asymmetrien und Fähigkeiten assoziiert. Basierend auf Ergebnissen der bisherigen Forschung ist anzunehmen, dass sich sowohl Männer und Frauen als auch Links- und Rechtshänder nicht nur in kognitiven Leistungen voneinander unterscheiden, sondern auch in ihren Lösungsstrategien.

Als wertvolles Werkzeug zur Erfassung funktioneller Beziehungen neokortikaler Regionen der beiden Hemisphären haben sich interhemisphärische EEG-Kohärenzen erwiesen. Ausgehend von den Ergebnissen der bisherigen Forschung ist eine mehr bilaterale Verarbeitung von Aufgabenstellungen bei Frauen und Linkshändern zu erwarten.

Händigkeits- sowie geschlechtsabhängige Unterschiede in den Kohärenzwerten finden sich sowohl beim Gesunden als auch bei einer Vielzahl von Erkrankungen bzw. Störungsbildern in der Medizin. Der Einfluss *beider* Merkmale wurde bisher jedoch unzureichend untersucht. Es wäre daher von großem Vorteil, solche Einflüsse zweier Merkmale bei Gesunden zu untersuchen, um Unterschiede zu krankhaften Prozessen abgrenzen zu können.

Um statistisch verlässliche Angaben bezüglich der beiden Merkmale erhalten zu können, sollten den Untersuchungen vergleichbare Fallzahlen zugrunde liegen.

In der vorliegenden Studie sollen ausschließlich interhemisphärische EEG-Kohärenzen während der Bearbeitung eines nonverbalen Intelligenztests untersucht werden. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Art der Aufgabenstellung während der EEG-Ableitung einen Einfluss auf eventuelle händigkeits- und/oder geschlechtsabhängige Unterschiede in interhemisphärischen EEG-Kohärenzen haben könnte. Daher sollen die Testergebnisse ebenfalls auf Unterschiede in Abhängigkeit von Geschlecht und Händigkeit geprüft und in die Betrachtung der anderen Resultate einbezogen werden.

Primäre Zielparameter dieser Studie sind Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht. Basierend auf bisherigen

Forschungsergebnissen wird die These formuliert, dass während nonverbaler Belastung Frauen in den interhemisphärischen Kohärenzen höhere Werte als Männer aufweisen. Als sekundäre Zielparameter sollen die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit betrachtet werden. Als weitere sekundäre Zielparameter sollen die nonverbalen Testwerte der Probanden auf geschlechts- und händigkeitsabhängige Unterschiede geprüft werden.

EEG-Kohärenzen sind ein viel versprechendes Werkzeug zur Erforschung individueller Unterschiede und zur Früherkennung und Differenzierung von Normabweichungen. Die Bestätigung der oben formulierten These über geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen und Aussagen über mögliche händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen könnten einen entscheidenden Beitrag zur Normierung der EEG-Merkmale beim Gesunden leisten.

Nach Prüfung der vorliegenden Literatur ist diese Thematik meines Erachtens nach mit der beschriebenen Herangehensweise noch nicht untersucht worden.

4 Material und Methoden

4.1 Auswahl der Probanden

4.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Durch Informationsmaterial, das an den Berliner Hochschulen verteilt wurde, gelang es, 92 Probanden (46 Frauen und 46 Männer) zu rekrutieren. Die Studie war der Ethikkommission der Charité vorgestellt und von dieser genehmigt worden. Die Probanden wurden vor Untersuchungsbeginn ausführlich über Ablauf und Design der Studie informiert und gaben ihr volles Informiertes Einverständnis in schriftlicher Form. Eine dem Zeitaufwand angemessene finanzielle Entschädigung wurde gewährt.

Vor Untersuchungsbeginn wurde eine ausführliche Anamnese mittels eines Interviews und eines demographischen Fragebogens erhoben, um die Übereinstimmung der Probanden mit den Einschlusskriterien sicherzustellen. Anhand des *Mini-SCID für gesunde Probanden* konnten zudem eventuelle Persönlichkeitsstörungen ausgeschlossen werden.

Einschlusskriterien:

- Alter zwischen 18 und 30 Jahren
- Aufklärung über Wesen, Bedeutung und Tragweite der Studie erhalten, Einverständniserklärung unterschrieben und eigenhändig datiert
- Allgemeine Hochschulreife
- Linkshändigkeit (Lateralitätsquotient zwischen -1 und -100) oder Rechtshändigkeit (Lateralitätsquotient zwischen $+60$ und $+100$)
- psychische und physische Gesundheit des Probanden sowie psychische Gesundheit der Verwandten ersten Grades
- Normalsichtigkeit, ggf. korrigiert

Ausschlusskriterien:

- Alter unter 18 oder über 30 Jahren
- Rücknahme der Einverständniserklärung
- Lateralitätsquotient zwischen 0 und $+59$
- psychische Erkrankung des Probanden oder eines Verwandten ersten Grades

- Substanzmissbrauch (Alkohol, illegale Drogen, Pharmaka)
- schwerwiegende somatische Erkrankung
- hirnorganische Erkrankungen einschließlich Epilepsie und Migräne
- regelmäßige Einnahme von Pharmaka, außer Vitaminen oder hormonellen Kontrazeptiva
- Genuss von Alkohol oder Einnahme von Pharmaka mit psychotropen Wirkungen innerhalb der letzten 24 Stunden vor der EEG-Ableitung

4.1.2 Einordnung der Händigkeit

Die Zugehörigkeit der Probanden zu einer Händigkeitsgruppe wurde mithilfe einer geringfügig modifizierten Form des Edinburgh-Händigkeits-Inventars nach Oldfield ermittelt (Oldfield, 1971). Anhand eines Fragebogens wird hierbei exploriert, mit welcher Hand unterschiedliche Alltagstätigkeiten bevorzugt ausgeführt werden.

Mittels eines mündlichen Interviews, in welchem die 13 Items dieses Fragebogens abgefragt wurden, konnte die bevorzugte Hand bei diversen Tätigkeiten erfasst werden. Bei auftretenden Unsicherheiten bezüglich der Bevorzugung einer Hand, sowie allen Tätigkeiten ohne Bevorzugung nur einer Hand, wurde unter Zuhilfenahme bereitgestellter Gegenstände die Einordnung der jeweiligen Tätigkeit überprüft.

Um zwischen starker, schwacher oder fehlender Bevorzugung einer Hand differenzieren zu können, standen jeweils fünf Antwortmöglichkeiten, mit entsprechender Verteilung von Punkten, zur Auswahl:

1. stets mit der rechten Hand: rechte Hand 2 Punkte
2. meist mit der rechten Hand: rechte Hand 2 Punkte, linke Hand 1 Punkt
3. keine Bevorzugung einer Hand: rechte Hand 1 Punkt, linke Hand 1 Punkt
4. meist mit der linken Hand: linke Hand 2 Punkte, rechte Hand 1 Punkt
5. stets mit der linken Hand: linke Hand 2 Punkte

Anhand der abgefragten Items wurde aus den Gesamtpunktwerten für jede Hand ein Lateralitätsquotient (LQ) ermittelt:

$$\text{LQ} = \frac{(\text{Punktwert rechte Hand} - \text{Punktwert linke Hand}) \times 100}{(\text{Punktwert rechte Hand} + \text{Punktwert linke Hand})}$$

Daraus ergibt sich ein Händigkeitsscore im Bereich zwischen +100 (alle erfassten Tätigkeiten werden immer mit der rechten Hand ausgeführt) und –100 (alle erfassten Tätigkeiten werden immer mit der linken Hand ausgeführt). Aufgrund dieses Lateralitätsquotienten erfolgte die Zuordnung zu einer Händigkeitsgruppe.

Rechtshändigkeit wurde hierbei definiert durch einen Lateralitätsquotienten zwischen +60 und +100, Linkshändigkeit hingegen durch einen Lateralitätsquotienten zwischen –1 und –100. Da ein Großteil der manifesten Linkshänder, unter anderem auf Grund des sozialen Druckes in einer mehrheitlich rechtshändigen Population, nicht für alle Tätigkeiten die dominante Hand nutzt, wurde für die Definition der Linkshänder eine größere Spannbreite akzeptiert als für die Definition der Rechtshänder.

Fragebogen zur Händigkeit	Punkte	
	rechts	links
1. Mit welcher Hand schreiben Sie?		
2. Mit welcher Hand zeichnen Sie?		
3. Mit welcher Hand werfen Sie einen Stein?		
4. Mit welcher Hand benutzen Sie eine Schere?		
5. In welcher Hand halten Sie die Zahnbürste?		
6. Welche Hand benutzen Sie zum Schneiden mit einem Messer (ohne Gabel)?		
7. In welcher Hand halten Sie den Löffel?		
8. Welche Hand ist die obere beim Führen eines Besens?		
9. Beim Anzünden eines Streichholzes: Welche Hand hält das Streichholz?		
10. Beim Öffnen einer Dose: Welche Hand hebt den Deckel?		
11. Beim Einfädeln eines Fadens in eine Nadel: Welche Hand bewegen Sie?		
12. Mit welcher Hand geben Sie beim Kartenspielen die Karten aus?		
13. Mit welcher Hand tragen Sie (zunächst) einen Koffer?		
Gesamtpunktwert:		
Lateralitätsquotient (LQ):		

Abb. 1 Fragebogen zur Erfassung der Händigkeit.

4.2 Technik der EEG-Ableitung und -Aufzeichnung

Die Untersuchungen fanden im Neurophysiologischen EEG-Labor der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Charité Berlin (Campus Mitte) statt.

Die Probanden hielten sich während der EEG-Ableitungen allein in einem schallgeminderten, elektrisch abgeschirmten und reizarmen Raum in Nachbarschaft zu den Aufzeichnungsgeräten auf. Eine entspannte Sitzhaltung wurde durch einen speziellen EEG-Stuhl ermöglicht.

Unter Verwendung eines 32-kanäligen EEG-Computers der Firma *Brain Products GmbH München* wurde das Elektroenzephalogramm aufgezeichnet und digitalisiert. Die Abtastrate (Sampling Rate) bei der Aufnahme betrug 500 Hz, die Signalauflösung (Resolution) 0,1 μ V. Es wurde ein *Butterworth Zero Phase Filter* mit Low-Cut-Off von 0,3 Hz und High-Cut-Off von 40 Hz eingesetzt. Zur Eliminierung des Netzbrummens wurde ein Netzsperrfilter (*Notch-Filter*) von 50 Hz genutzt.

Eine mit nicht polarisierbaren Silber-Silberchlorid-Elektroden versehene EEG-Haube der Marke *Easy Cap EEG recording caps* wurde für die Probanden entsprechend ihrer jeweiligen Kopfgröße ausgewählt. Die Anordnung der Elektroden entsprach dem internationalen 10/20-System (Jaspers, 1958) unter zusätzlicher Verwendung der Elektroden Tp9 und Tp10. Das EEG wurde gegen gemittelte Signale an TP9/Tp10 abgeleitet, wobei Fz als Erdungselektrode diente. Zur Artefaktkontrolle (durch Augenbewegungen) wurde ein horizontales Elektroofokulogramm (EOG) abgeleitet; hierfür wurde eine weitere Elektrode (Lo1) etwa 1cm distal des linken unteren Augenlides platziert.

Zur Senkung des Hautleitwiderstandes wurde die Kopfhaut unter den Elektroden mit einer Peeling-Creme der Marke *Nuprep* eingerieben. Um einen optimalen Kontakt zwischen Kopfhaut und Elektrode herzustellen, wurde zusätzlich eine Elektrodenpaste der Marke *eci elektro-gel* aufgetragen.

Die Impedanzen sämtlicher Elektroden lagen dadurch bei allen Ableitungen stets unter 5 kOhm.

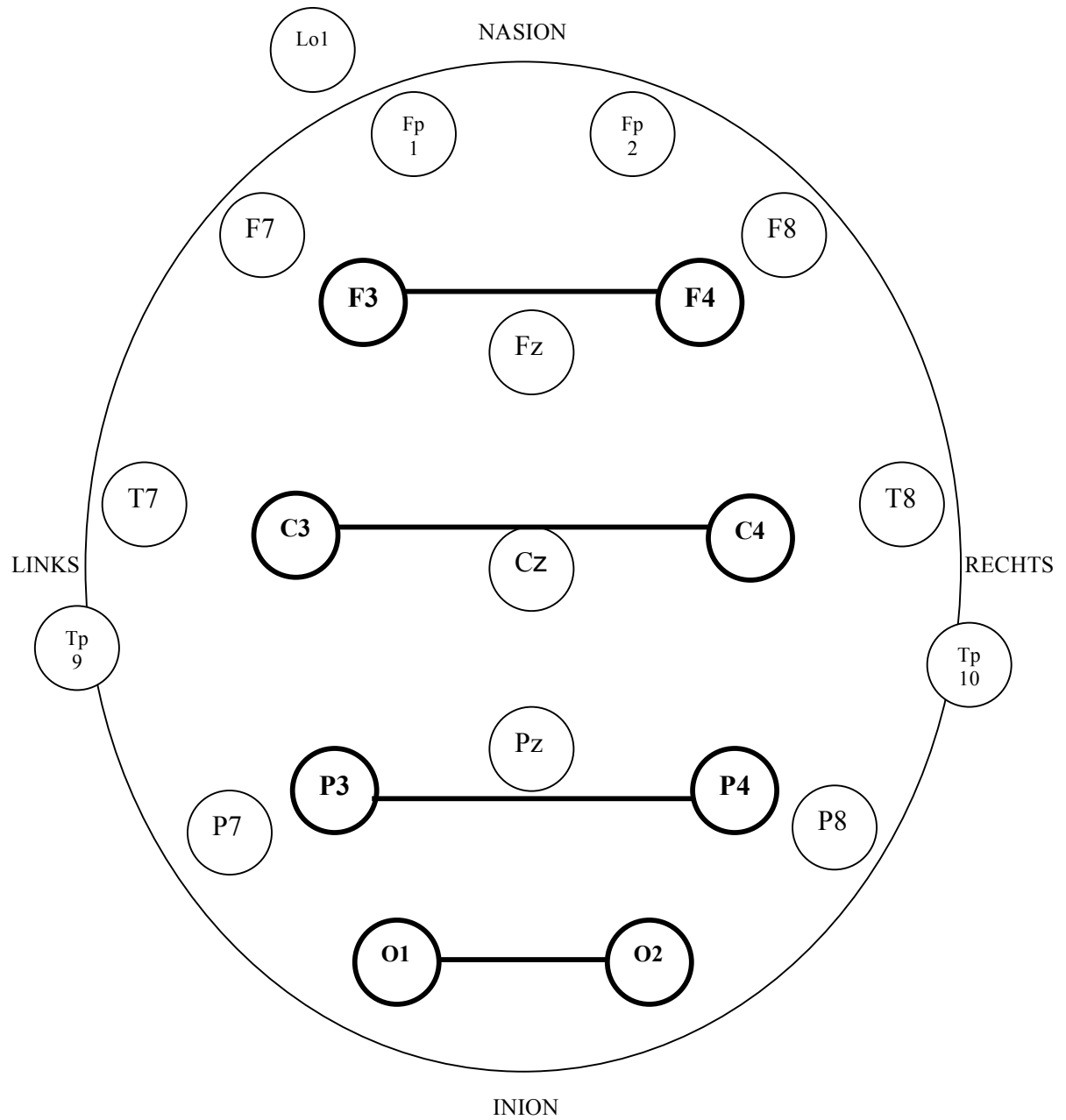


Abb. 2 Anordnung der Elektroden nach dem internationalen 10/20-System. Fett hervorgehoben sind die Interhemisphärischen Kohärenzen, die für die Auswertung vorgesehen waren: Frontal F3F4, Zentral C3C4, Parietal P3P4, Okzipital O1O2.

4.3 Versuchsablauf

Den Untersuchungen vorausgehend fand mit jedem Probanden ein Telefongespräch statt, in welchem über Art, Zweck und Dauer des Versuchs informiert, sowie die Eignung als Teilnehmer eruiert wurde.

Um einen Einfluß möglicher physiologischer Schwankungen, z.B. der Vigilanz, durch die circadiane Rhythmik gering zu halten, begannen die Untersuchungen stets zwischen 8 und 10 Uhr und nahmen jeweils zwei bis drei Stunden in Anspruch.

Nach ausführlicher mündlicher und schriftlicher Aufklärung der Probanden wurde zunächst die Händigkeit anhand des Edinburgh-Händigkeits-Inventars nach Oldfield ermittelt (Oldfield, 1971). Außerdem wurde eine ausführliche mündliche Anamnese erhoben. Die Teilnehmer füllten sodann folgende Fragebögen aus: *Demographische Angaben zur Untersuchung* und *Mini-SCID für gesunde Probanden*.

Im Anschluss wurde dem Probanden die EEG-Haube wie oben beschrieben angelegt. Zur Ableitung des EEGs nahm der Untersuchungsteilnehmer in einem reizarmen Raum eine entspannte Sitzhaltung ein. Die Impedanzen der Elektroden wurden überprüft, außerdem wurde das EEG visuell auf Artefaktfreiheit geprüft.

Danach erhielt der Proband die Anweisungen für die Phase der EEG-Ableitung. Die Versuchsperson hatte genau fünf Minuten Zeit, einen nonverbalen Test zu bearbeiten (LPS-3, vgl. 4.4.1). Währenddessen wurde das EEG abgeleitet und zur Auswertung aufgezeichnet. Nach Ende dieser fünf Minuten musste der Proband die Lösung der nonverbalen Aufgaben abbrechen.

Nach Beendigung der EEG-Aufzeichnungen und Entfernung der Haube wurde abschließend die Aufwandsentschädigung ausgehändigt und dies dokumentiert.

4.4 Verarbeitung der gewonnenen Daten

4.4.1 Erfassung und Auswertung des nonverbalen Tests (LPS-3)

Die nonverbale Intelligenz der Probanden wurde anhand des Leistungsprüfsystem-Untertests-3 (LPS-3) nach Horn erfasst. Das Leistungsprüfsystem (Horn, 1962) ist ein globaler Intelligenztest, welcher bevorzugt in Schulen und bei Berufsberatungen eingesetzt wird. Er besteht aus 14 Untertests, welche einzelne Primärfähigkeiten, wie beispielsweise Allgemeinbildung, kristalline Intelligenz, Wortflüssigkeit und räumliches Vorstellungsvermögen in unterschiedlichem Ausmaß testen.

Der Untertest-3 des LPS erfasst die logische Denkfähigkeit sowie das Erkennen von Regeln und Gesetzmäßigkeiten. Er testet somit weitgehend bildungsunabhängige Aspekte der Intelligenz.

Der Testperson wird ein Aufgabenblatt vorgelegt, auf dem in 40 Zeilen mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad jeweils acht Zeichen bzw. Symbole dargeboten werden. Diese acht Elemente folgen stets einer bestimmten logischen oder formalen Gesetzmäßigkeit. Nur jeweils ein Element passt nicht in dieses logische Prinzip. Der Untersuchungsteilnehmer wird angewiesen, dieses nicht passende Zeichen zu markieren, wobei er Zeile für Zeile bearbeitet. Wird eine Lösung nicht erkannt, soll unverzüglich zur nächsten Zeile übergegangen werden. Zur Bearbeitung des Tests werden dem Teilnehmer genau fünf Minuten Zeit gegeben.

Aufgrund der Schwere des Tests war es keinem unserer Probanden möglich, alle 40 Aufgaben in der vorgegebenen Zeit richtig zu lösen.

Da die Übereinstimmung der nonverbalen Intelligenzwerte des LPS-3-Untertests mit dem LPS-Gesamtwert mit einer Korrelation von $r=0,81$ sehr hoch ist, besitzt er wichtige Voraussetzungen zur Grobklassifikation der allgemeinen Intelligenz (Horn, 1962).

Anhand von Umrechnungstabellen konnten die Testrohwerte des LPS-3-Untertests in C-Werte der Intelligenz überführt werden. Diese C-Werte entsprechen Perzentilen, wobei 1 den niedrigsten und 10 den höchsten möglichen Wert darstellt. Sie wurden als sekundäre Zielparameter statistisch ausgewertet.

4.4.2 Auswertung des digitalen EEGs

Die Bearbeitung des aufgezeichneten EEGs erfolgte unter Zuhilfenahme der Software *Vision Analyzer* der Firma *Brain Products GmbH*. Zur Auswertung wurden die jeweils fünf Minuten langen EEG-Abschnitte herangezogen, die aufgezeichnet worden waren, während die Probanden den LPS-3-Untertest bearbeiteten.

Zunächst wurden die EEG-Abschnitte vor der weiteren Analyse sowohl visuell als auch automatisch auf Artefakte überprüft und diese dann eliminiert. Nach automatischer Untersuchung auf Kanalausfälle durch den *Raw Data Inspektor* wurden die Daten gemäß den oben beschriebenen Einstellungen gefiltert. Danach wurden die EEG-Abschnitte wie folgt aufbereitet: Zunächst wurden die Daten in 2-Sekunden-Epochen, entsprechend 1024 Datenpunkten, segmentiert. Die Korrektur der Augenbewegungen erfolgte semiautomatisch mittels *des Algorithmus nach Gratton & Coles*, sowie durch eine visuelle Kontrolle der EEG-Abschnitte. Ebenso wurden durch visuelle Kontrolle Segmente mit u.a. muskulär bedingten Artefakten ausgesondert. Die Anzahl der resultierenden artefaktfreien Epochen lag bei den EEG-Abschnitten stets über sechzig 2-Sekunden-Epochen bzw. über insgesamt zwei Minuten. Sämtliche artefaktfreie 2-Sekunden-Epochen wurden sodann fourier-transformiert und die gemittelten Leistungs- und Kreuzleistungsspektren für die EEG-Abschnitte errechnet.

Für die statistische Analyse waren vier Kohärenzen relevant: frontal F3F4, zentral C3C4, parietal P3P4, okzipital O1O2. Auf diese Weise war es möglich, die interhemisphärischen Kohärenzen, welche den interhemisphärischen Transfer widerspiegeln, frontal bis okzipital zu betrachten.

Die gemittelten Kreuzleistungsspektren beziehen sich auf die interhemisphärischen Elektrodenpaare. Das Kohärenzspektrum ist das normierte Kreuzleistungsspektrum. Somit wurden für jeden Probanden vier Kohärenzwerte pro Frequenzband errechnet.

Die Kohärenz Fp1Fp2 wurde nicht in die Auswertung einbezogen, da das EEG hier bei nahezu allen Probanden von muskulären Artefakten überlagert war. Ebenfalls für die statistische Auswertung nicht berücksichtigt wurden die Kohärenzen F7F8, T7T8 und P7P8, da hier (aufgrund der lateralen Lage und der somit größeren Distanz der Elektroden zueinander) ein höherer individueller Einfluss der Kopfgröße der Probanden auf die Kohärenzen nicht auszuschließen war.

Folgende Frequenzbänder waren für die Untersuchungen relevant:

1. Deltaband: 1,5 - 3,5 Hz
2. Thetaband: 4,0 - 7,5 Hz
3. Alphanband: 8,0 - 12,5 Hz
4. Beta-1-band: 13,0 - 18,0 Hz
5. Beta-2-band: 18,5 - 24,0 Hz
6. Beta-3-band: 24,5 - 31,5 Hz

4.4.3 Statistische Auswertung

Für jeden Probanden wurden, wie oben beschrieben, vier interhemisphärische Kohärenzen für jedes Frequenzband berechnet und der weiteren statistischen Analyse zugeführt.

Die Probanden wurden nach Händigkeit und Geschlecht gruppiert. Somit entstanden jeweils zwei Gruppen zu je 46 Probanden (Männer und Frauen bzw. Linkshänder und Rechtshänder) oder vier Gruppen zu je 23 Probanden (linkshändige Frauen, linkshändige Männer, rechtshändige Frauen und rechtshändige Männer). Diese Gruppen wurden auf Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzwerten untersucht.

Die statistische Datenanalyse erfolgte mithilfe des Statistik-Programms *SPSS Version 11.5*. Sämtliche Daten wurden zunächst auf Normalverteilung geprüft. Da eine Normalverteilung nicht immer gegeben war, wurden im Folgenden ausschließlich statistische Tests herangezogen, welche nicht notwendigerweise normalverteilte Daten verlangen.

Zunächst erfolgte eine deskriptive Datenanalyse der interhemisphärischen Kohärenzen. Dabei wurden für jede Gruppe deskriptive statistische Werte wie Median, 25. und 75. Perzentile ermittelt bzw. zur graphischen Veranschaulichung Boxplots erstellt.

Als primäre Zielparameter wurden die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht betrachtet. Hierzu wurde zunächst die Gruppe aller Frauen mit der Gruppe aller Männer verglichen. Um einen Einfluss der Händigkeit auf geschlechtsabhängige Unterschiede in den Kohärenzwerten aufzudecken, wurden anschließend linkshändige Männer mit linkshändigen Frauen, sowie rechtshändige Männer mit rechtshändigen Frauen verglichen.

Zur Verifizierung der Unterschiede in den Kohärenzen zwischen männlichen und weiblichen Probanden wurde der nichtparametrische Test nach Mann-Whitney angewandt. Durch diesen Test lassen sich zwei unabhängige Stichproben anhand der Rangwerte bzw. Rangsummen miteinander vergleichen. Er überprüft die Hypothese, dass die beiden Stichproben derselben Grundgesamtheit entstammen.

Als Schwelle des Signifikanzniveaus für die primären Zielparameter wurde für sämtliche Berechnungen ein p-Wert kleiner 0,05 angenommen. Statistisch signifikante geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen wurden zur Veranschaulichung in Boxplots dargestellt.

Als sekundäre Zielparameter wurden die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit betrachtet. Für jede Probanden-Gruppe wurde zunächst eine explorative Datenanalyse durchgeführt. Danach wurde zur orientierenden Überprüfung auf mögliche Unterschiede zwischen den Gruppen der nichtparametrische Test nach Mann-Whitney angewandt. Die Gruppe aller Linkshänder wurde zunächst mit der Gruppe aller Rechtshänder verglichen. Um den Einfluss des Geschlechts auf händigkeitsabhängige Unterschiede in den Kohärenzwerten aufzuzeigen, wurden sodann linkshändige Männer mit rechtshändigen Männern sowie linkshändige Frauen mit rechtshändigen Frauen verglichen.

Da händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen lediglich als sekundäre Zielparameter betrachtet wurden, also keine vorher aufgestellte These überprüft wurde, kann hinsichtlich der mittels Mann-Whitney-Test ermittelten Werte im Falle $p < 0,05$ nicht von signifikanten Werten gesprochen werden. Um mögliche händigkeitsabhängige Unterschiede abschätzen zu können, wurden die p-Werte kleiner 0,05 dennoch angegeben und die entsprechenden Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen zur Veranschaulichung in Boxplots dargestellt. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Werte nicht als statistisch signifikant gewertet wurden.

Weitere sekundäre Zielparameter waren die nonverbalen Testwerte des LPS-Untertests-3 in Abhängigkeit von Geschlecht und Händigkeit. Für jede Probanden-Gruppe bzw. -Untergruppe wurde eine explorative Datenanalyse der Test-C-Werte durchgeführt. Hierbei wurden wiederum deskriptive statistische Werte wie Median, 25. und 75. Perzentile ermittelt und diese zur graphischen Veranschaulichung in Boxplots dargestellt.

5 Ergebnisse

5.1 Primäre Zielparameter - Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht

Grundlagen: Es wurde die These aufgestellt, dass Frauen während der Bearbeitung des nonverbalen Tests (LPS-3) höhere interhemisphärische Kohärenzen als Männer aufweisen würden. Um dies zu prüfen, wurden die 92 Probanden abhängig von ihrem Geschlecht zwei Gruppen zugeordnet: einer männlichen Gruppe und einer weiblichen Gruppe.

Die Gruppe aller Frauen der Stichprobe (N=46, linkshändige und rechtshändige Frauen) wurde mit der Gruppe aller Männer der Stichprobe (N=46, linkshändige und rechtshändige Männer) hinsichtlich ihrer interhemisphärischen Kohärenzwerte verglichen.

Um den Einfluss der Händigkeit auf die geschlechtsabhängigen Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen zu ermitteln, wurden die 92 Probanden abhängig von ihrer Händigkeit *und* ihrem Geschlecht in vier Gruppen eingeteilt: rechtshändige Männer (N=23), rechtshändige Frauen (N=23), linkshändige Männer (N=23) und linkshändige Frauen (N=23).

Innerhalb der Linkshändergruppe (N=46) wurden die linkshändigen Männer mit den linkshändigen Frauen verglichen, und innerhalb der Rechtshändergruppe (N=46) wurden die rechtshändigen Männer mit den rechtshändigen Frauen verglichen.

Anhand des nichtparametrischen Tests nach Mann-Whitney wurden die Kohärenzwerte der zwei unabhängigen Stichproben (männliche und weibliche Probanden) nach Rangwerten geordnet und miteinander verglichen, sowie das Signifikanzniveau der Unterschiede zwischen den Stichproben bestimmt.

5.1.1 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht

In der Gruppe aller Frauen (N=46) zeigten sich stets höhere interhemisphärische Kohärenzen als in der Gruppe aller Männer (N=46). Ausschließlich die statistisch signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) wurden zur Veranschaulichung in Boxplots dargestellt.

In allen sechs Frequenzbändern fanden sich bei der Mehrzahl der Elektrodenpaare signifikant höhere interhemisphärische Kohärenzwerte bei den Frauen verglichen mit den Männern: im Delta-Frequenzband zentral bis okzipital: C3C4 ($p < 0,001$), P3P4 ($p = 0,001$) und O1O2 ($p = 0,015$); im Theta-Frequenzband zentral C3C4 ($p = 0,001$) und parietal P3P4 ($p < 0,001$); im Alpha-Frequenzband frontal F3F4 ($p = 0,001$) und okzipital O1O2 ($p = 0,050$); im Beta-1-Frequenzband zentral bis okzipital: C3C4 ($p = 0,011$), P3P4 ($p = 0,006$) und O1O2 ($p = 0,015$); im Beta-2-Frequenzband frontal bis okzipital: F3F4 ($p = 0,024$), C3C4 ($p = 0,025$), P3P4 ($p = 0,047$) und O1O2 ($p = 0,003$); sowie im Beta-3-Frequenzband frontal F3F4 ($p = 0,046$), parietal P3P4 ($p = 0,043$) und okzipital O1O2 ($p = 0,001$).

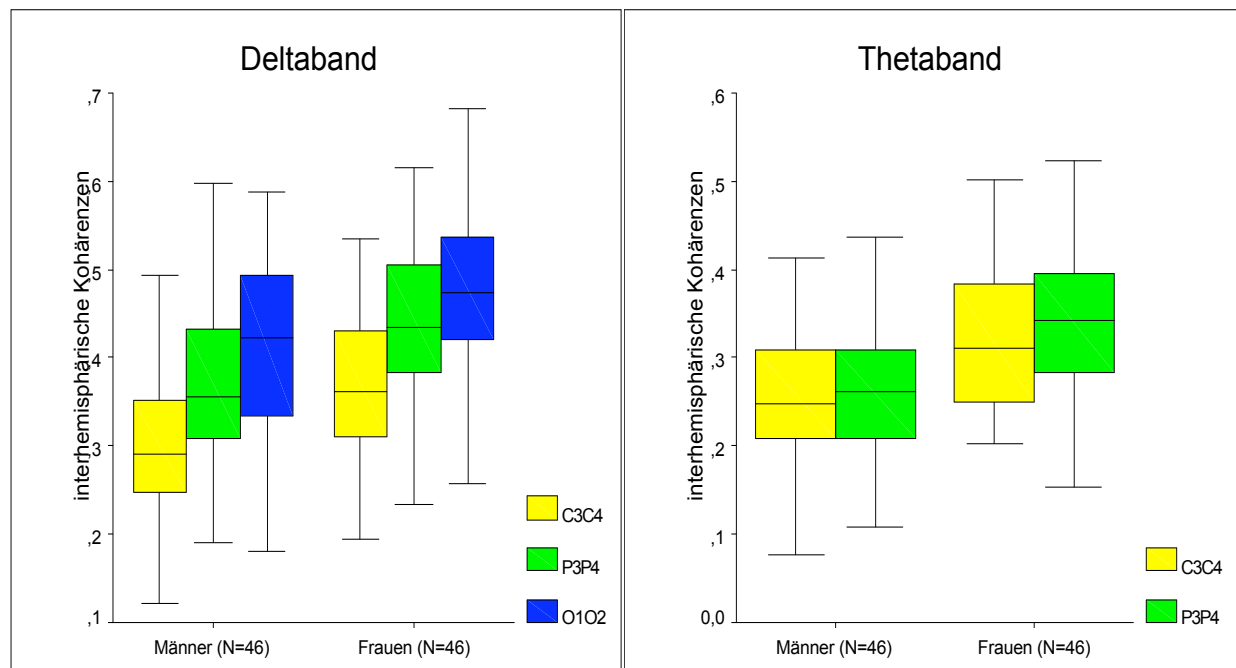


Abb. 3 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen im Delta-Frequenzband und im Theta-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

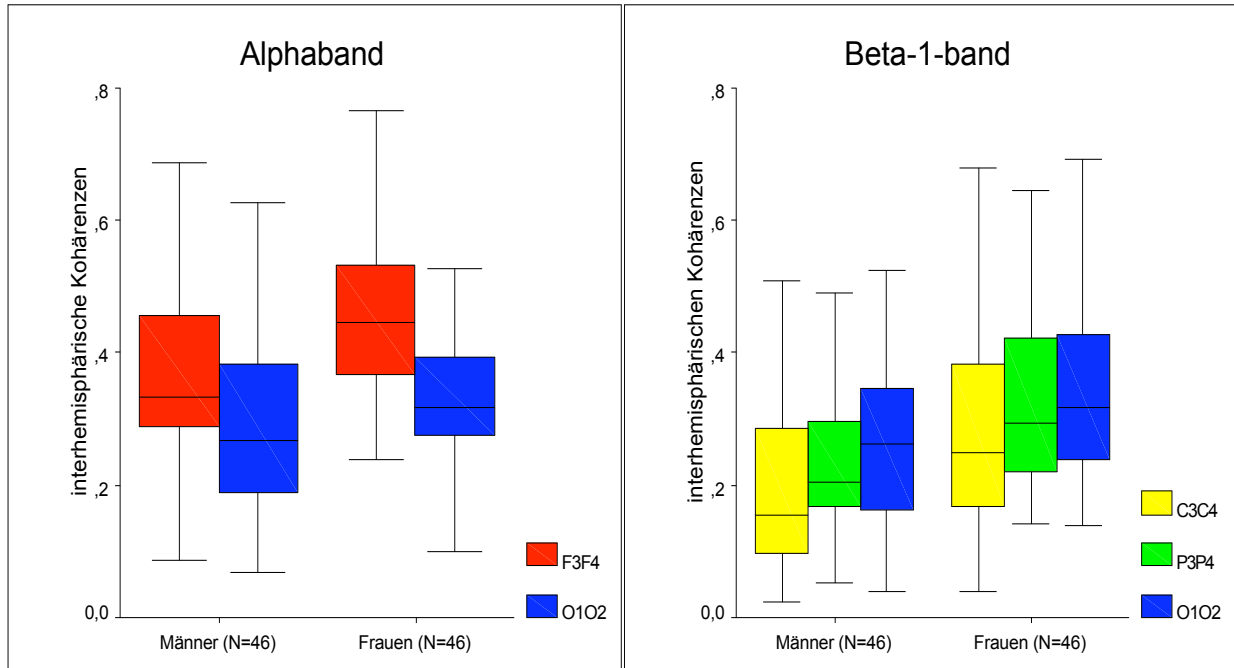


Abb. 4 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen im Alpha-Frequenzband und im Beta-1-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

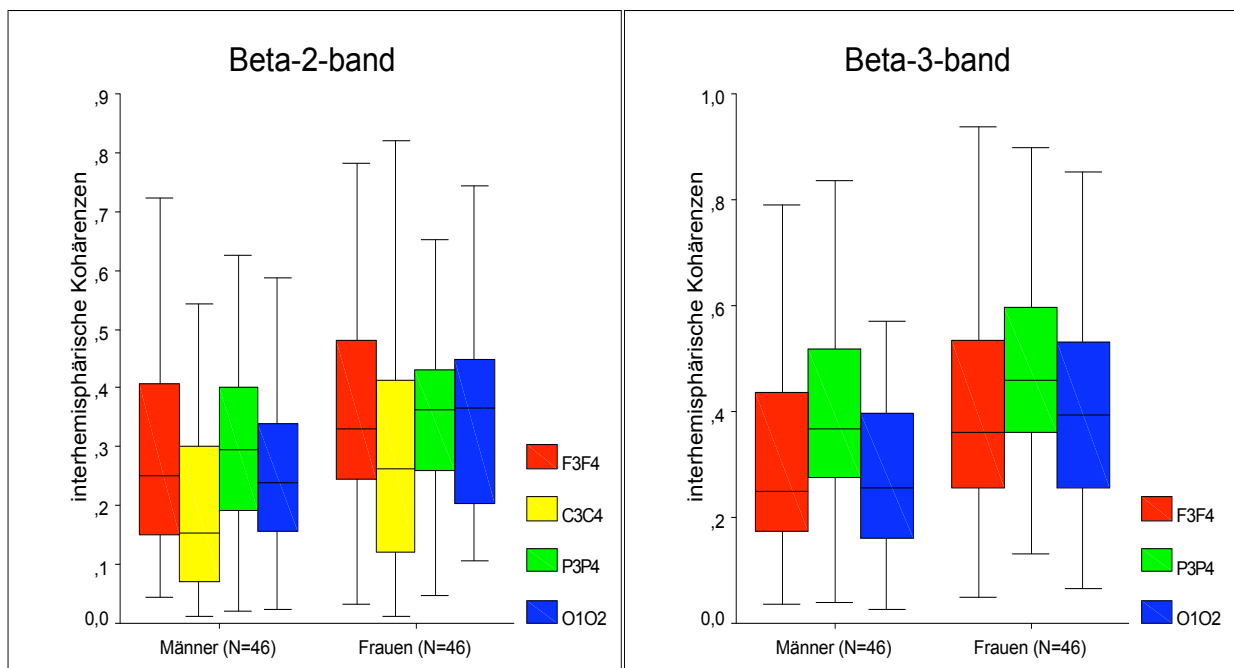


Abb. 5 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen im Beta-2-Frequenzband und im Beta-3-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

Die Daten zeigten, dass Frauen im Vergleich zu Männern während der EEG-Ableitung auch dann geringfügig höhere interhemisphärische EEG-Kohärenzen (Mediane) aufwiesen, wenn die Kohärenzunterschiede die Schwelle des Signifikanzniveaus verfehlten.

Dies traf für alle vier untersuchten interhemisphärischen Kohärenzen von frontal bis okzipital, sowie für alle Frequenzbänder zu (siehe Tabelle Seite 51/52).

5.1.2 Einfluss der Händigkeit auf geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen

Interhemisphärische Kohärenzen der Linkshänder:

Bei den linkshändigen Frauen (N=23) zeigten sich im Vergleich zu den linkshändigen Männern (N=23) signifikant höhere interhemisphärische Kohärenzen beim überwiegenden Teil der betrachteten Kohärenzen in allen Frequenzbändern (siehe Boxplots): im Deltaband zentral bis okzipital: C3C4 ($p=0,001$), P3P4 ($p<0,001$) und O1O2 ($p=0,002$); im Thetaband frontal bis okzipital: F3F4 ($p=0,036$), C3C4 ($p=0,001$), P3P4 ($p<0,001$) und O1O2 ($p=0,040$); im Alphanband frontal F3F4 ($p<0,001$); im Beta-1-band parietal P3P4 ($p=0,007$) und okzipital O1O2 ($p=0,012$); im Beta-2-band frontal F3F4 ($p=0,008$) und okzipital O1O2 ($p=0,011$); sowie im Beta-3-band frontal F3F4 ($p=0,014$) und okzipital O1O2 ($p=0,003$).

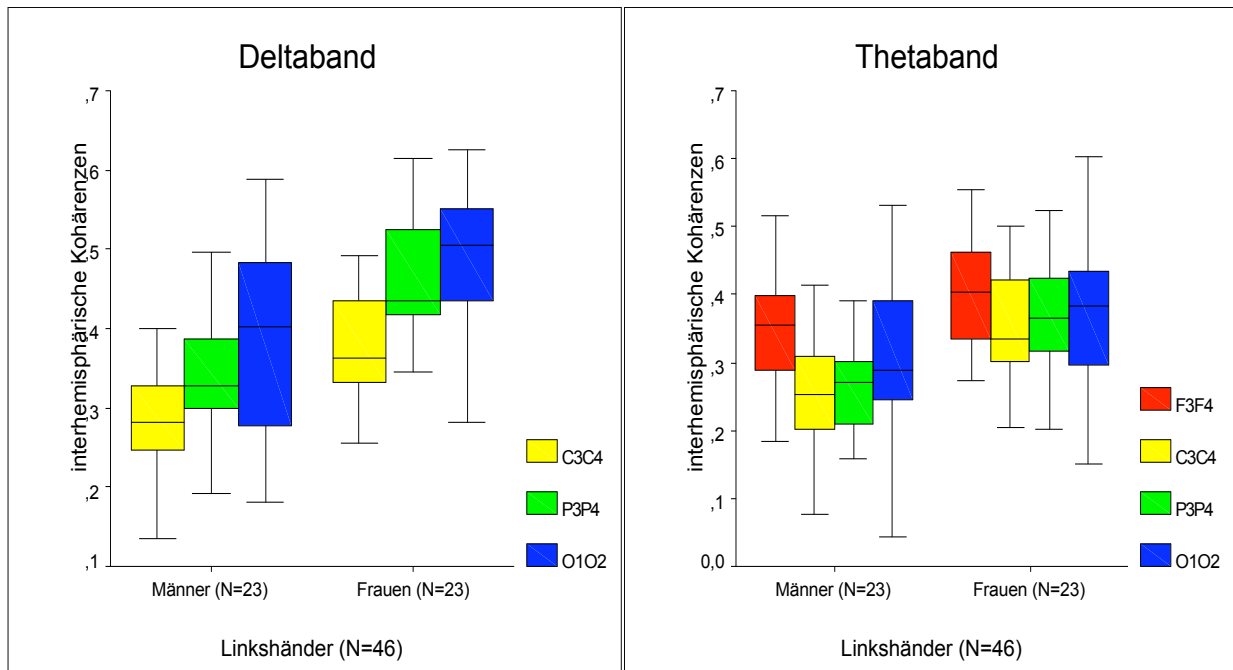


Abb. 6 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Linkshänder im Delta-Frequenzband und im Theta-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

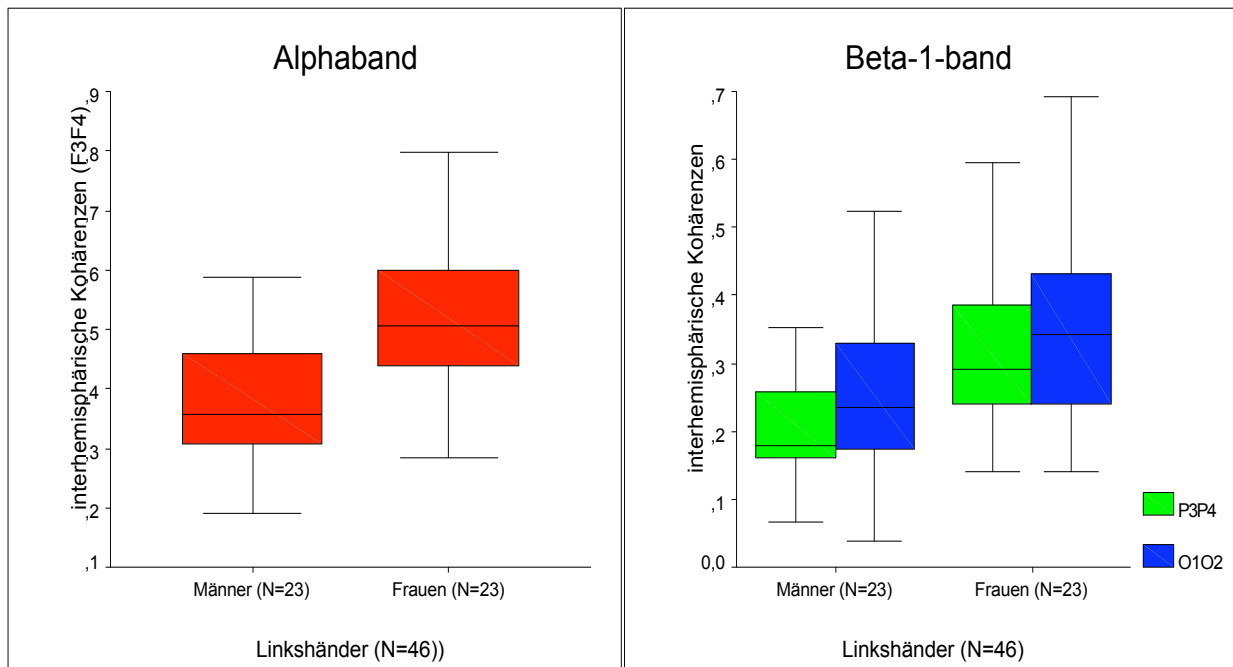


Abb. 7 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Linkshänder im Alpha-Frequenzband und im Beta-1-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

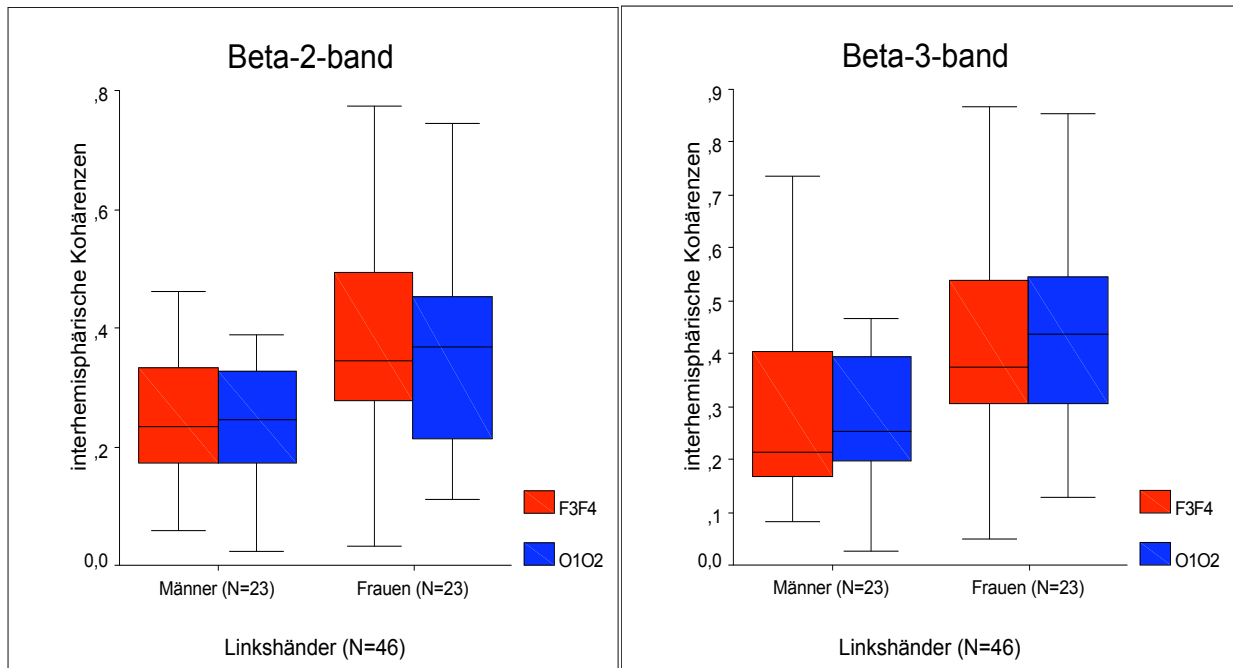


Abb. 8 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Linkshänder im Beta-2-Frequenzband und im Beta-3-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

Interhemisphärische Kohärenzen der Rechtshänder:

Ein deutlich höherer interhemisphärischer Kohärenzwert bei den rechtshändigen Frauen (N=23) verglichen mit den rechtshändigen Männern (N=23) fand sich im Beta-2-Frequenzband zentral C3C4 ($p=0,049$). Dieser ist im Folgenden in Boxplots dargestellt.

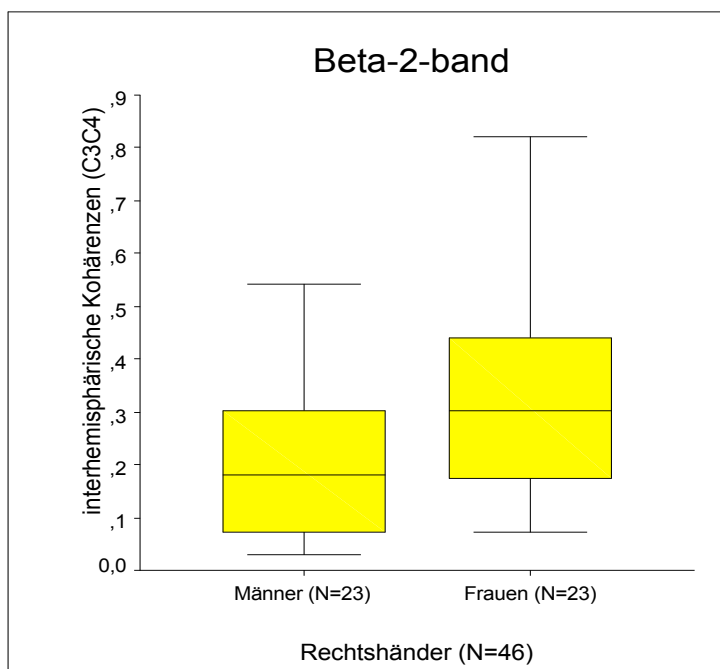


Abb. 9 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Rechtshänder im Beta-2-Frequenzband in Abhängigkeit vom Geschlecht.

Sowohl bei den Linkshändern (N=46) als auch bei den Rechtshändern (N=46) wiesen die Frauen (links- bzw. rechtshändige Frauen, je N=23) stets auch dann geringfügig höhere interhemisphärische Kohärenzen (Mediane) als die Männer auf (links- bzw. rechtshändige Männer, je N=23), wenn die Kohärenzunterschiede die Schwelle des Signifikanzniveaus verfehlten. Dies traf für alle vier Elektrodenpaare und für alle Frequenzbänder zu (siehe Tabelle Seite 51/52).

5.2 Sekundäre Zielparameter - Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit

Ziel war es, händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die 92 Probanden gemäß ihrer Händigkeit in zwei Gruppen eingeteilt: Linkshänder und Rechtshänder.

Die Gruppe aller Linkshänder der Stichprobe (N=46, männliche und weibliche Linkshänder) wurde mit der Gruppe aller Rechtshänder der Stichprobe (N=46, männliche und weibliche Rechtshänder) hinsichtlich ihrer interhemisphärischen Kohärenzwerte verglichen.

Um den Einfluss des Geschlechts auf die händigkeitsabhängigen Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen zu ermitteln, wurden die 92 Probanden abhängig von ihrer Händigkeit *und* ihrem Geschlecht wiederum in vier Gruppen eingeteilt: rechtshändige Männer (N=23), rechtshändige Frauen (N=23), linkshändige Männer (N=23) und linkshändige Frauen (N=23).

Innerhalb der weiblichen Gruppe (N=46) wurden die weiblichen Linkshänder mit den weiblichen Rechtshändern verglichen, und innerhalb der männlichen Gruppe (N=46) wurden die männlichen Linkshänder mit den männlichen Rechtshändern verglichen.

Anhand des nichtparametrischen Tests nach Mann-Whitney wurden die Kohärenzwerte der beiden unabhängigen Stichproben (Linkshänder und Rechtshänder) miteinander verglichen. Zur Veranschaulichung wurden die Unterschiede im Falle $p < 0,05$ in Boxplots dargestellt. Da diese Unterschiede lediglich als sekundäre Zielparameter betrachtet wurden, kann hier jedoch nicht von signifikanten Unterschieden gesprochen werden.

5.2.1 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit

Händigkeitsabhängige Unterschiede in den Kohärenzwerten ergaben sich an drei Elektrodenpaaren. Diese sind zur Veranschaulichung in Boxplots dargestellt.

Im Alpha-Frequenzband wies die Gruppe aller Linkshänder (N=46) im Vergleich zur Gruppe aller Rechtshänder (N=46) eine etwas höhere interhemisphärische Kohärenz frontal F3F4 auf ($p=0,005$).

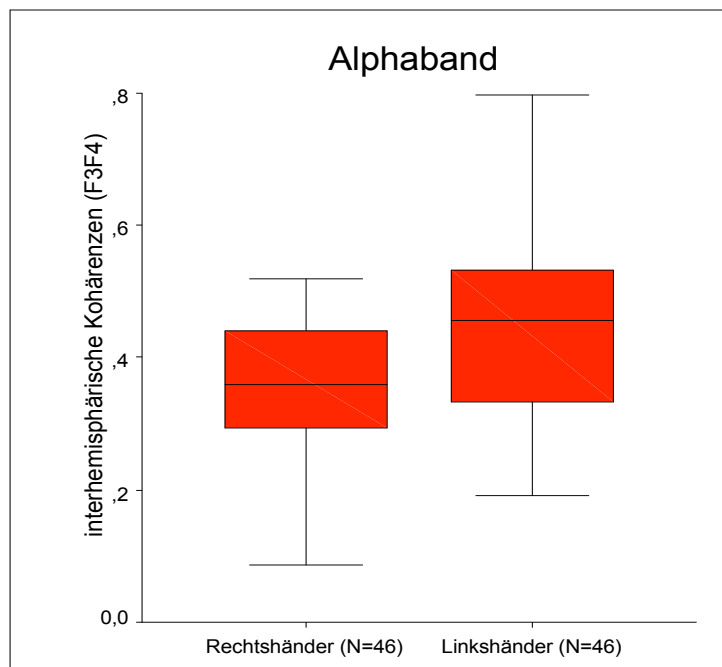


Abb. 10 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen im Alpha-Frequenzband in Abhängigkeit von der Händigkeit.

Hingegen fanden sich etwas höhere interhemisphärische Kohärenzen bei den Rechtshändern im Vergleich zu den Linkshändern im Beta-2-Frequenzband frontal F3F4 ($p=0,011$), sowie im Beta-3-Frequenzband zentral C3C4 ($p=0,029$) und parietal P3P4 ($p=0,012$).

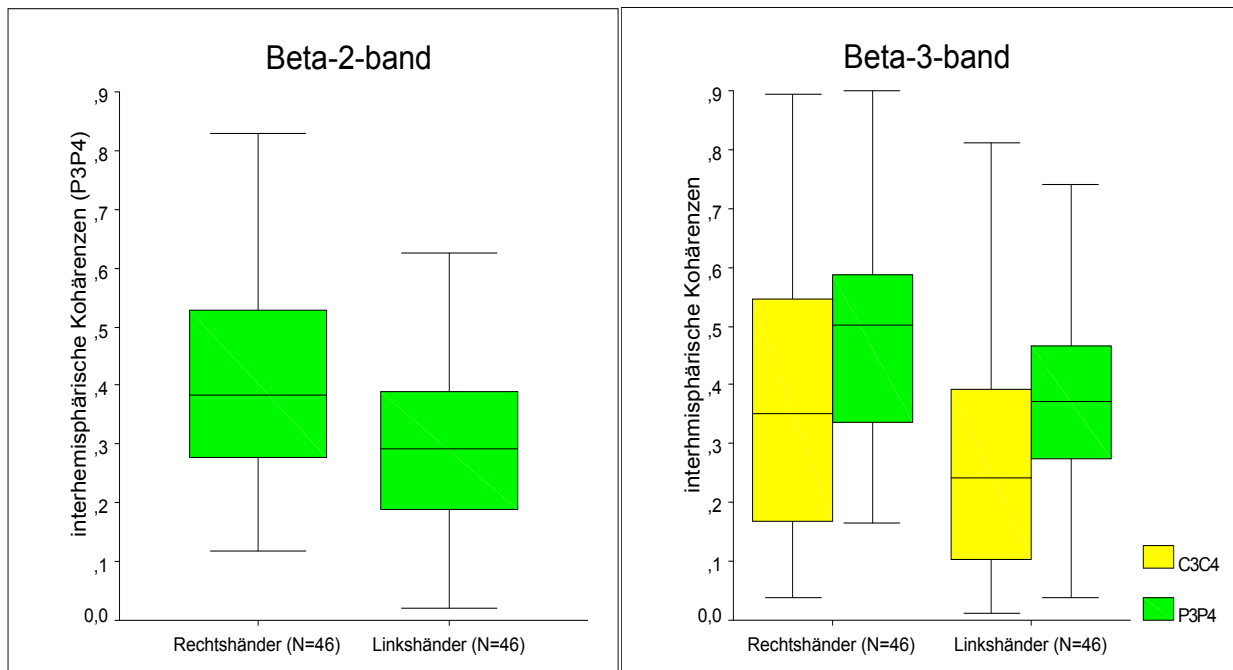


Abb. 11 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen im Beta-2-Frequenzband und Beta-3-Frequenzband in Abhängigkeit von der Händigkeit.

Die interhemisphärischen Kohärenzen (Mediane) waren im Theta-Frequenzband frontal bis okzipital bei den Linkshändern geringfügig höher als bei den Rechtshändern. In den anderen Frequenzbändern fand sich kein einheitlicher Trend zugunsten einer Händigkeitsgruppe (siehe Tabelle Seite 51/52).

5.2.2 Einfluss des Geschlechts auf händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen

Interhemisphärische Kohärenzen der Frauen:

Bei den linkshändigen Frauen (N=23) zeigten sich im Vergleich zu den rechtshändigen Frauen (N=23) etwas höhere interhemisphärische Kohärenzen im Thetaband frontal bis parietal (siehe Boxplots): F3F4 ($p=0,018$), C3C4 ($p=0,012$) und P3P4 ($p=0,030$), sowie im Alphaband frontal F3F4 ($p<0,001$).

Die rechtshändigen Frauen (N=23) zeigten im Gegensatz zu den linkshändigen Frauen (N=23) eine etwas höhere interhemisphärische Kohärenz im Alphaband parietal bei P3P4 ($p=0,049$).

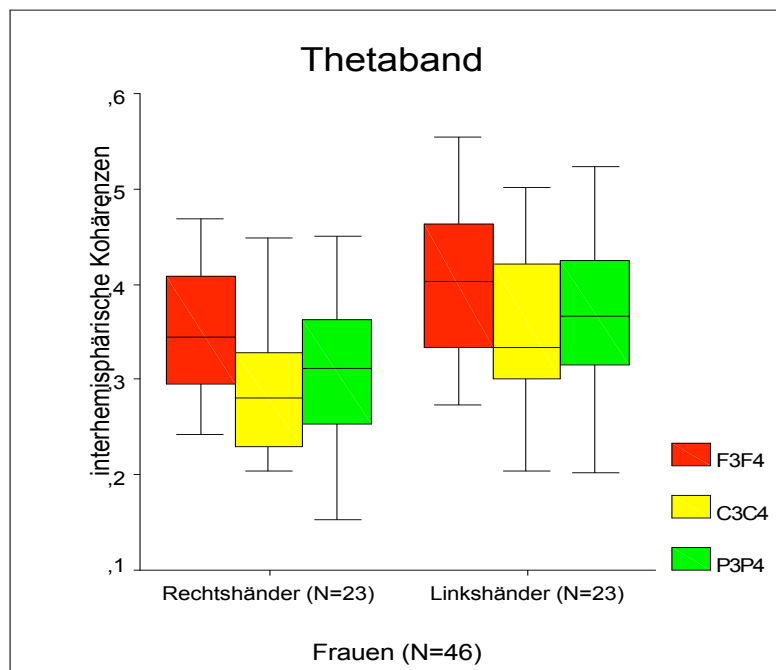


Abb. 12 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Frauen im Theta-Frequenzband in Abhängigkeit von der Händigkeit.

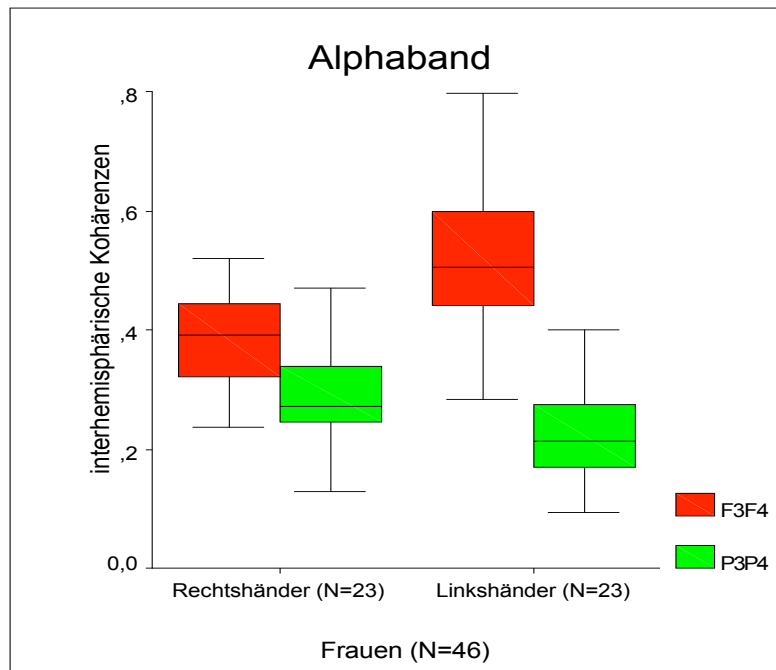


Abb. 13 Interhemisphärische EEG-Kohärenzen der Frauen im Alpha-Frequenzband in Abhängigkeit von der Händigkeit.

Die linkshändigen Frauen hatten im Delta- und Theta-Frequenzband frontal bis okzipital geringfügig höhere interhemisphärische Kohärenzen (Mediane) als die rechtshändigen Frauen.

Im Alpha-Frequenzband sowie in den Beta-Frequenzbändern war kein einheitlicher Trend erkennbar (siehe Tabelle Seite 51/52).

Interhemisphärische Kohärenzen der Männer:

Bei den männlichen Probanden traten keine deutlichen Unterschiede der interhemisphärischen Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit auf.

Die rechtshändigen Männer (N=23) hatten frontal bis okzipital geringfügig höhere interhemisphärische Kohärenzen (Mediane) als die linkshändigen Männer (N=23) im Delta- und Beta-3-Frequenzband.

In den übrigen Frequenzbändern war kein einheitlicher Trend erkennbar (siehe Tabelle Seite 51/52).

TABELLE 1
Interhemisphärische EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit und dem Geschlecht

Frequenzband	Elektrodenpaar	Aufteilung der Fälle nach Händigkeit <i>oder</i> Geschlecht				Aufteilung der Fälle nach Händigkeit <i>und</i> Geschlecht			
		Rechtshänder (N=46)	Linkshänder (N=46)	Männer (N=46)	Frauen (N=46)	rechtshändige Männer (N=23)	rechtshändige Frauen (N=23)	linkshändige Männer (N=23)	linkshändige Frauen (N=23)
		Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)
Delta	F3F4	,328 (,245 /,414)	,331 (,250 /,441)	,317 (,235 /,400)	,350 (,267 /,459)	,318 (,227 /,411)	,332 (,268 /,443)	,316 (,244 /,399)	,360 (,263 /,471)
	C3C4	,333 (,276 /,410)	,329 (,270 /,394)	,291 (,247 /,352)	,363 (,310 /,431)	,305 (,252 /,405)	,362 (,302 /,418)	,283 (,244 /,331)	,363 (,316 /,438)
	P3P4	,411 (,332 /,473)	,401 (,328 /,459)	,357 (,307 /,437)	,435 (,382 /,505)	,375 (,316 /,472)	,425 (,356 /,475)	,329 (,297 /,389)	,435 (,414 /,535)
	O1O2	,448 (,400 /,495)	,453 (,336 /,525)	,423 (,331 /,495)	,474 (,420 /,539)	,448 (,401 /,500)	,450 (,364 /,493)	,402 (,265 /,493)	,506 (,420 /,554)
Theta	F3F4	,328 (,288 /,407)	,379 (,316 /,448)	,336 (,284 /,399)	,387 (,319 /,441)	,328 (,274 /,361)	,345 (,289 /,413)	,356 (,288 /,400)	,403 (,332 /,476)
	C3C4	,257 (,218 /,325)	,304 (,246 /,360)	,247 (,207 /,310)	,311 (,247 /,386)	,232 (,213 /,308)	,281 (,225 /,334)	,254 (,202 /,317)	,334 (,294 /,424)
	P3P4	,286 (,213 /,347)	,313 (,238 /,372)	,262 (,207 /,309)	,343 (,281 /,398)	,261 (,198 /,309)	,311 (,243 /,371)	,272 (,208 /,310)	,366 (,314 /,441)
	O1O2	,330 (,268 /,388)	,346 (,264 /,421)	,314 (,253 /,391)	,352 (,287 /,417)	,315 (,267 /,391)	,342 (,268 /,387)	,289 (,237 /,392)	,382 (,293 /,439)
Alpha	F3F4	,360 (,294 /,443)	,455 (,332 /,536)	,334 (,286 /,457)	,445 (,364 /,536)	,333 (,273 /,413)	,392 (,317 /,449)	,358 (,294 /,461)	,506 (,432 /,607)
	C3C4	,201 (,107 /,275)	,176 (,111 /,285)	,158 (,100 /,270)	,212 (,133 /,292)	,134 (,068 /,293)	,223 (,158 /,268)	,168 (,108 /,263)	,182 (,113 /,324)
	P3P4	,267 (,180 /,336)	,214 (,140 /,278)	,220 (,133 /,295)	,250 (,179 /,337)	,238 (,145 /,331)	,270 (,243 /,343)	,210 (,112 /,279)	,212 (,160 /,277)
	O1O2	,293 (,230 /,384)	,313 (,210 /,389)	,269 (,189 /,384)	,318 (,273 /,396)	,265 (,190 /,348)	,312 (,160 /,277)	,290 (,155 /,389)	,323 (,264 /,405)

TABELLE 1 (Fortsetzung)

Frequenz- band	Elektroden- paar	Aufteilung der Fälle nach Händigkeit <i>oder</i> Geschlecht				Aufteilung der Fälle nach Händigkeit <i>und</i> Geschlecht			
		Rechtshänder (N=46)	Linkshänder (N=46)	Männer (N=46)	Frauen (N=46)	rechtshändige Männer (N=23)	rechtshändige Frauen (N=23)	linkshändige Männer (N=23)	linkshändige Frauen (N=23)
		Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)	Median (Perzentile) (25./75.)
Beta-1	F3F4	,332 (,235 /,488)	,361 (,249 /,452)	,313 (,209 /,456)	,380 (,279 /,460)	,312 (,175 /,515)	,337 (,278 /,469)	,313 (,244 /,391)	,392 (,280 /,457)
	C3C4	,184 (,116 /,412)	,180 (,132 /,287)	,155 (,095 /,295)	,250 (,163 /,396)	,150 (,100 /,404)	,250 (,167 /,446)	,162 (,086 /,269)	,243 (,150 /,360)
	P3P4	,282 (,191 /,423)	,251 (,172 /,314)	,206 (,166 /,305)	,293 (,221 /,421)	,269 (,178 /,387)	,311 (,201 /,462)	,178 (,155 /,259)	,290 (,236 /,405)
	O1O2	,273 (,189 /,391)	,278 (,214 /,388)	,264 (,162 /,347)	,318 (,237 /,429)	,268 (,161 /,407)	,280 (,235 /,386)	,235 (,162 /,344)	,341 (,238 /,434)
Beta-2	F3F4	,283 (,152 /,455)	,295 (,225 /,440)	,249 (,150 /,412)	,329 (,244 /,482)	,280 (,129 /,467)	,285 (,221 /,403)	,232 (,171 /,364)	,346 (,276 /,499)
	C3C4	,244 (,106 /,374)	,160 (,076 /,307)	,154 (,069 /,302)	,262 (,116 /,414)	,180 (,070 /,312)	,301 (,150 /,498)	,115 (,055 /,300)	,174 (,090 /,412)
	P3P4	,383 (,273 /,527)	,293 (,189 /,395)	,294 (,189 /,403)	,363 (,250 /,431)	,382 (,201 /,515)	,383 (,314 /,552)	,272 (,156 /,329)	,323 (,192 /,419)
	O1O2	,285 (,172 /,391)	,314 (,179 /,385)	,239 (,152 /,341)	,366 (,203 /,451)	,205 (,126 /,360)	,330 (,197 /,392)	,244 (,169 /,330)	,367 (,205 /,457)
Beta-3	F3F4	,358 (,201 /,571)	,329 (,193 /,439)	,248 (,172 /,452)	,361 (,254 /,536)	,274 (,174 /,580)	,359 (,212 /,478)	,214 (,163 /,413)	,374 (,284 /,540)
	C3C4	,350 (,168 /,554)	,241 (,102 /,401)	,250 (,101 /,436)	,314 (,162 /,537)	,257 (,122 /,528)	,428 (,213 /,580)	,205 (,082 /,349)	,249 (,120 /,431)
	P3P4	,503 (,334 /,590)	,371 (,271 /,474)	,367 (,271 /,517)	,460 (,357 /,598)	,468 (,314 /,551)	,504 (,393 /,613)	,353 (,234 /,413)	,409 (,326 /,555)
	O1O2	,333 (,184 /,423)	,341 (,204 /,442)	,256 (,159 /,397)	,395 (,252 /,532)	,317 (,143 /,395)	,361 (,231 /,448)	,253 (,194 /,405)	,436 (,277 /,554)

5.3 Sekundäre Zielparameter - Die nonverbale Intelligenz in Abhängigkeit von Geschlecht und Händigkeit

Um die händigkeits- und geschlechtsabhängigen Unterschiede in der nonverbalen Intelligenz der 92 Probanden zu explorieren, wurden diese jeweils in zwei Gruppen zu je N=46 eingeteilt: Linkshänder und Rechtshänder (männliche *und* weibliche) bzw. Männer und Frauen (linkshändige *und* rechtshändige).

Die explorative Datenanalyse ergab die Mediane betrachtend geringfügig niedrigere C-Werte im LPS-3-Test bei den Linkshändern im Vergleich zu den Rechtshändern. Zwischen Männern und Frauen fand sich kein Unterschied in den Testwerten.

Mit Ausnahme dieser dezenten händigkeitsabhängigen Differenz der Mediane unterschied sich die Streuung der C-Werte des LPS-3 weder zwischen Linkshändern und Rechtshändern, noch zwischen Männern und Frauen.

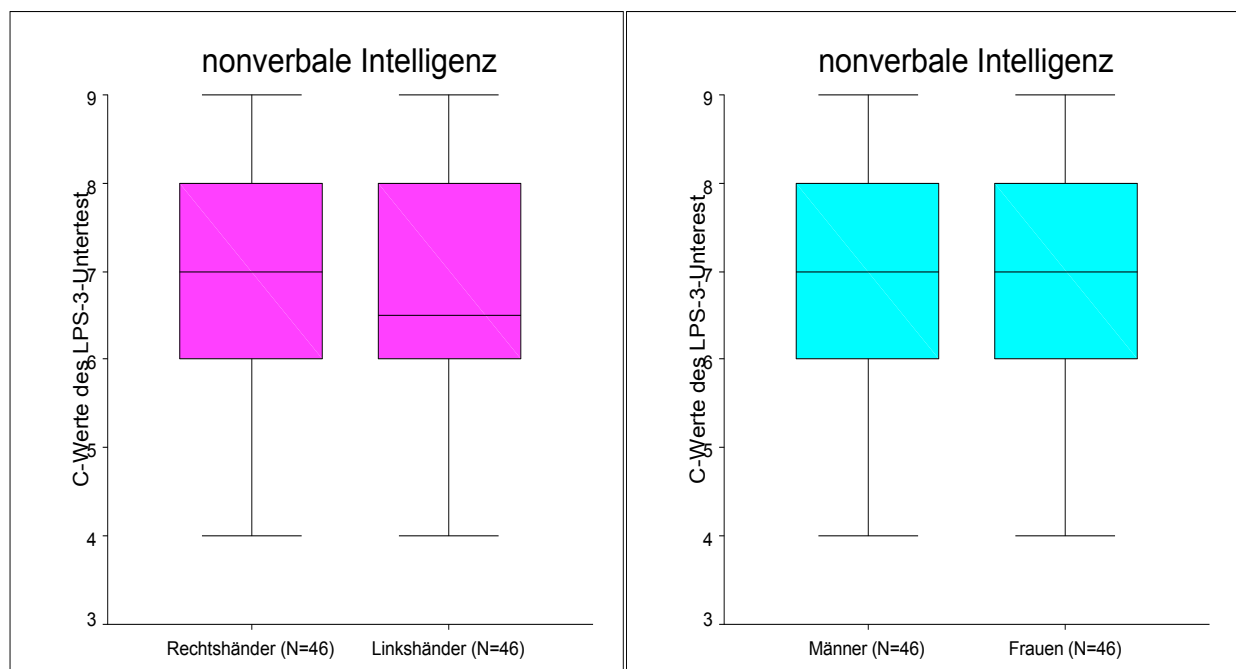


Abb. 14 Die nonverbale Intelligenz der Probanden in Abhängigkeit von der Händigkeit oder vom Geschlecht.

Nach der weiteren Unterteilung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Händigkeit und des Geschlechts, ergaben sich folgende vier Gruppen (zu je N=23): rechtshändige Männer, linkshändige Männer, rechtshändige Frauen und linkshändige Frauen.

Bei den Frauen zeigten sich abhängig von der Händigkeit geringfügige Unterschiede in den medianen Test-C-Werten, wobei die Werte der linkshändigen Frauen etwas unter denen der rechtshändigen Frauen lagen. Die Streuung der Werte differierte stärker zwischen den weiblichen Untergruppen als zwischen den männlichen Untergruppen.

Zwischen links- und rechtshändigen Männern ergaben sich keine Unterschiede in den Testwerten (Mediane bzw. 25. und 75. Perzentilen). Die Streuung der Test-C-Werte unterschied sich geringfügig, mit niedrigeren kleinsten Werten bei den rechtshändigen Männern.

Zwischen rechtshändigen Männern und Frauen ergaben sich keine Unterschiede in den Testwerten, lediglich die Streuung der Werte war bei den rechtshändigen Männern größer. Bei den Linkshändern fanden sich ebenfalls nur geringfügige geschlechtsabhängige Unterschiede mit einer größeren Streuung der Werte bei den linkshändigen Frauen.

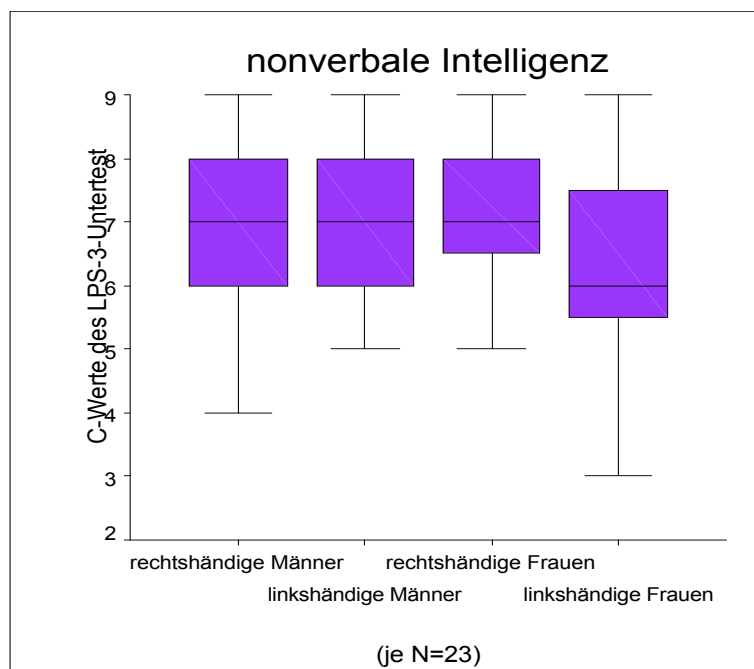


Abb. 15 Die nonverbale Intelligenz der Probanden in Abhängigkeit von Händigkeit und Geschlecht.

6 Diskussion

6.1 Bedeutung der Ergebnisse für die Medizin

Das EEG wird in der Medizin zur Diagnostik vieler Krankheiten herangezogen (Neundörfer, 2002). Hierzu gehören, um nur einige Beispiele zu nennen, Erkrankungen und Normabweichungen aus den Bereichen der Neurologie (Epilepsie, Schädelhirntraumen, Tumoren), der Inneren Medizin (Stoffwechselstörungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schilddrüsenerkrankungen), der Pharmakologie (Medikamenteneinnahme, Drogenintoxikation) und der Psychiatrie (Psychosen, Verhaltensstörungen, Bewusstseinsstörungen).

Um Aussagen über Abweichungen in den EEG-Mustern machen zu können, muss möglichst viel Wissen über das EEG beim Gesunden gesammelt werden. Es ist notwendig, Normwerte für Gesunde zu definieren, um Normabweichungen quantifizieren zu können.

Psychiatrische Krankheitsbilder wie Psychosen können unter anderem mit einer Störung der funktionellen Organisation des Gehirns in Zusammenhang gebracht und teilweise durch die Lateralität dysfunktionaler Elemente erklärt werden. Eine weniger lateralisierte Kortexorganisation bei schizophrenen Patienten erklärt möglicherweise die wiederholt berichtete Assoziation mit der Linkshändigkeit (Shaw et al., 1983; Sommer et al., 2001). Eine bei Kranken im Vergleich zu Gesunden veränderte Lateralisation von Kortexarealen könnte in verändertem interhemisphärischem Transfer oder in veränderten lateralisierten Prozessen der Hemisphären begründet sein. Ein krankhaft veränderter Transfer über das Corpus Callosum trägt möglicherweise zu den gestörten Denkprozessen und Verhaltensweisen bei solchen Erkrankungen bei.

EEG-Kohärenzen sind ein nichtinvasives Mittel, den interhemisphärischen Transfer zu erfassen. Gerade in den Fachbereichen der Neurophysiologie und Psychiatrie wurden EEG-Kohärenzen als sensitives Maß für die Abgrenzung von Störungsbildern gegenüber dem „Gesunden“ herangezogen. Untersucht wurden beispielsweise Änderungen der EEG-Kohärenzen bei Schizophrenie, Neuroleptikaeinnahme, Marihuanakonsum, Balkenagenesie, mentaler Retardierung und Morbus Alzheimer (Ford et al., 1986; Kuks et al., 1987; Doody et al., 1999; Struve et al., 1998; Pogarell et al., 2005; Jiang und Zheng, 2006).

Der Einfluss des Alters auf die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen wurde bereits in einigen Arbeiten untersucht. Die Kohärenzwerte sollen vom jungen Erwachsenenalter bis ins hohe Alter abnehmen, was unter anderem auf eine Involution des Corpus Callosum zurückgeführt werden kann (Ford et al., 1986; Duffy et al., 1996). Außerdem postulierten Jeeves und Moes (1996) eine Zunahme der interhemisphärischen Transferzeit bei über 60-jährigen. Altersbedingte Einflüsse auf die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen und deren Abhängigkeit von Geschlecht und/oder Händigkeit wurden in der vorliegenden Studie gering gehalten, da sich sämtliche Probanden in der Phase des „jungen Erwachsenenalters“ (18-30 Jahre) befanden.

In der Literatur finden sich zuweilen Angaben über eine Vorab-Selektion bestimmter Frequenzbereiche für die Datenanalyse. Dies liegt zum einen in der Erwartung begründet, die vermuteten Ergebnisse im gewählten Frequenzbereich zu finden. Zum anderen werden Frequenzbänder von der Auswertung ausgeschlossen, um die Datenmenge zu reduzieren oder eine Artefaktkontamination zu verringern (Ford et al., 1986). Viele Daten in der Literatur zu interhemisphärischen EEG-Kohärenzen beziehen sich daher nur auf einzelne Frequenzbereiche.

Die Frequenzbereiche wurden für die vorliegende Studie in Anlehnung an die in der Kohärenzforschung viel zitierten Arbeiten von Rappelsberger festgelegt (Rappelsberger et al., 1988, 1993 und 2000).

Alle sechs Frequenzbänder, welche den Frequenzbereich 1,5–31,5 Hz abdecken, wurden in die Auswertung einbezogen. Die Auswertung der interhemisphärischen Kohärenzen der frontal bis okzipital angeordneten Elektrodenpaare ergab signifikante geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen, die in allen sechs Frequenzbändern zu finden waren.

Zu geschlechtsabhängigen Kohärenzunterschieden zwischen erwachsenen Männern und Frauen liegen einige Arbeiten vor, jedoch wurde einem gleichzeitigen Einfluss der Händigkeit *und* des Geschlechts bisher nur wenig Beachtung geschenkt (Duffy et al., 1996). Für die Untersuchungen zu den Kohärenzen bei Links- und Rechtshändern gilt Ähnliches. Auch hier wurde dem Einfluss des Faktors Geschlecht keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt. In bisherigen Arbeiten über EEG-Kohärenzen wurde das EEG zudem in einer Ruhephase oder unter verbaler Belastung abgeleitet.

Arbeiten zu geschlechtsabhängigen Unterschieden in den interhemisphärischen Kohärenzen bei gesunden Probanden unter Berücksichtigung der Händigkeit während nonverbaler Belastung liegen bislang meines Wissens nach in dieser Form nicht vor.

Die in der vorliegenden Studie gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschiede der interhemisphärischen EEG-Kohärenzen unter Berücksichtigung der Händigkeit während der Bearbeitung eines nonverbalen Tests können eine Grundlage für zukünftige Forschungsvorhaben bilden und einen Beitrag zur Normierung von Kohärenzwerten beim Gesunden leisten.

6.2 Einschätzung der Ergebnisse im Vergleich zu Daten aus der Literatur

6.2.1 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht

Vor Beginn der Untersuchungen wurde postuliert, dass Frauen gegenüber Männern höhere interhemisphärische Kohärenzen während nonverbaler Belastung aufweisen. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen diese Annahme.

Während der Bearbeitung des nonverbalen Tests (LPS-Untertest-3) waren die interhemisphärischen Kohärenzen bei den Frauen stets höher als bei den Männern. Dies galt interessanterweise auch dann für alle vier untersuchten Kohärenzen in sämtlichen Frequenzbändern, wenn die Kohärenzwerte die Schwelle des Signifikanzniveaus verfehlten. Statistisch signifikant waren diese Unterschiede in 17 von 24 Fällen: zentral bis okzipital im Deltaband, zentral und parietal im Thetaband, frontal und okzipital im Alphanband, zentral bis okzipital im Beta-1-Band, frontal bis okzipital im Beta-2-Band sowie frontal, parietal und okzipital im Beta-3-Band.

Die gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschiede bestätigen frühere Studien. Während der Ruhe und während verbaler Belastung waren höhere interhemisphärische Kohärenzen bei den weiblichen Probanden im Vergleich zu den männlichen Probanden gefunden worden.

In einer Studie an 371 Probanden wurden von Duffy et al. (1996) bei Frauen höhere interhemisphärische Kohärenzen von frontal bis okzipital beschrieben. Marosi et al. (1993) untersuchten 42 rechtshändige gesunde Kinder im Alter von 7,6–13,3 Jahren und fanden bei den Mädchen verglichen mit den Jungen höhere intrahemisphärische Kohärenzen rechts sowie höhere interhemisphärische Kohärenzen in allen Frequenzbändern außer dem Alphanband. Auch van Beijsterveldt et al. (1998) fanden in einer Studie an 213 16-jährigen gesunden Zwillingspaaren signifikante Unterschiede in

Abhängigkeit vom Geschlecht. In allen Frequenzbändern hatten die Frauen höhere intrahemisphärische Kohärenzen.

Einschränkend sei darauf hingewiesen, dass Kohärenzwerte mit zunehmender Distanz der Elektrodenpaare zueinander leicht absinken (French und Beaumont, 1984). Daher waren geringfügig niedrigere interhemisphärische Kohärenzen von vornherein für die Gruppe der Männer zu erwarten, da diese durchschnittlich größere Kopfumfänge aufweisen als Frauen. Allerdings wurden die vier betrachteten Elektrodenpaare bewusst so ausgewählt, dass ein vergleichsweise geringer Abstand zueinander bestand (vgl. Elektrodenschema im Abschnitt „Methoden“, Abb. 2). Ein Einfluss der anatomischen Schädelmaße konnte somit vernachlässigt werden.

Eine mögliche Erklärung für die höheren Kohärenzen bei Frauen ist eine höhere Rate an weißer Substanz im Vergleich zu grauer Substanz sowohl intrahemisphärisch als auch im Corpus Callosum (Gur et al., 1980). Obwohl einige Untersuchungen morphologische Unterschiede des Corpus Callosum bei Männern und Frauen nahe legen, waren Replikationen der einzelnen Untersuchungen im Ergebnis nicht immer konsistent (Luders et al., 2003; Cowell et al., 1992; Giedd et al., 1996). Größe und Form des Corpus Callosum allein scheinen daher nicht ausreichend für die Erklärung der geschlechtsabhängigen Unterschiede im interhemisphärischen Transfer und in den interhemisphärischen Kohärenzen zu sein.

Einen nennenswerten Einfluss auf die gefundenen Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen zwischen Männern und Frauen dürfte hingegen die hemisphärische Lateralisation haben. Frauen sollen ein weniger lateralisiertes Großhirn haben. Die hemisphärischen Asymmetrien z.B. der Sprachzentren und des zentralen Sulcus sind bei ihnen im Vergleich zu den Männern insgesamt weniger stark ausgeprägt (Amunts et al., 2000). Dies lässt bei Frauen höhere interhemisphärische Kohärenzen erwarten als bei Männern.

Die unterschiedliche kortikale Organisation äußert sich auch in unterschiedlichen Fähigkeiten (Pogun, 2001). Während Frauen in verbalen Leistungen überlegen sein sollen (Russo et al., 2000), schnitten Männer in Untersuchungen tendenziell besser ab, wenn es um die Lösung räumlich-visueller Aufgabenstellungen ging (Crucian et al., 1998; Roberts et al., 2000).

Jiang und Zheng (2006) werteten höhere Kohärenzwerte als Ausdruck einer Kompensation bei größerer kognitiver Belastung. Ausgehend von den oft postulierten Unterschieden in der Begabung zwischen den Geschlechtern, könnte dieser Theorie

zufolge ein vergleichsweise geringeres kognitives Leistungsvermögen bei der Bearbeitung eines nonverbalen Tests kompensatorisch zu erhöhtem interhemisphärischem Transfer bei den Frauen geführt haben. Das Ergebnis der Geschlechtsunterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen hätte in diesem Sinne durch die Auswahl der Aufgabenform beeinflusst werden können.

Allerdings zeigten die Frauen in der vorliegenden Studie keine schlechteren Leistungen bei der Lösung des nonverbalen Tests. Zudem wurden auch während der Bearbeitung verbaler Aufgaben höhere Kohärenzen bei Frauen im Vergleich zu Männern gefunden (Volf und Razumnikova, 1999). Da Frauen jedoch bei verbalen Aufgabenstellungen bessere Ergebnisse als Männer aufweisen sollen (siehe oben), steht dies im Gegensatz zu der Annahme, höhere Kohärenzen seien im Sinne einer Kompensation niedrigeren Leistungsvermögens zu werten.

Frauen weisen anscheinend sowohl während Ruhebedingungen als auch während verbaler und nonverbaler Belastung höhere Kohärenzen als Männer auf. Die Kompensation niedrigeren Leistungsvermögens scheint für höhere Kohärenzwerte daher keine suffiziente Erklärung zu sein. Die Ergebnisse weisen vielmehr darauf hin, dass sowohl die intellektuelle Begabung, als auch die Höhe der interhemisphärischen Kohärenzen von einem oder mehreren weiteren Faktoren beeinflusst werden könnten. Solche Faktoren sind die Lateralisation und die interhemisphärischen Verbindungen.

Es ist denkbar, dass eine unterschiedliche funktionelle kortikale Organisation bei Frauen und Männern sowohl zu Unterschieden in der Höhe der interhemisphärischen Kohärenzen führt als auch zu unterschiedlichem Leistungsvermögen bei verbalen und nonverbalen Aufgabenstellungen. Möglicherweise spielt die Effizienz des interhemisphärischen Transfers für die Sprachbegabung eine größere Rolle als für Begabungen im nonverbalen Bereich.

6.2.2 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit vom Geschlecht unter Berücksichtigung der Händigkeit

Für alle vier Elektrodenpaare wurde in allen untersuchten Frequenzbändern ein Unterschied in der Höhe der interhemisphärischen EEG-Kohärenzen zwischen Männern und Frauen gefunden. Interessant ist, dass diese Unterschiede in der Gruppe der Linkshänder deutlicher hervortraten als in der Gruppe der Rechtshänder. Die in der gesamten Stichprobe gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen wurden also maßgeblich durch die Untergruppe der Linkshänder beeinflusst.

Zu Geschlechts-und-Händigkeits-Interaktionen bei EEG-Kohärenzen gibt es nur wenige Veröffentlichungen. Dies mag einerseits darin begründet sein, dass die betrachteten Fallzahlen nach Aufteilung in solche interagierenden Gruppen zu gering für eindeutige Aussagen waren. Andererseits fand der Einfluss *beider* Parameter, also Geschlecht *und* Händigkeit, auf interhemisphärische Kohärenzen bisher leider wenig Beachtung. So wurden für Untersuchungen mittels EEG-Kohärenzen oftmals überwiegend männliche und/oder rechtshändige Probanden ausgewählt (Shaw et al., 1983; Tucker et al., 1986; Coren, 1995). Dies führt dazu, dass viele Erkenntnisse der Kohärenzforschung auf Untersuchungen rechtshändiger Männer beruhen, während linkshändige Frauen seltener einbezogen, geschweige denn gesondert untersucht worden sind.

In einer Studie von Duffy et al. (1996) war in einer Untergruppe von 63 Probanden eine Geschlechts-und-Händigkeits-Interaktion aufgefallen: Die rechtshändigen Frauen zeigten höhere interhemisphärische Kohärenzen als die rechtshändigen Männer, aber die linkshändigen Frauen zeigten niedrigere interhemisphärische Kohärenzen als die linkshändigen Männer.

Im Gegensatz dazu hatten die Frauen in der vorliegenden Studie sowohl in der Untergruppe der Linkshänder als auch in der Untergruppe der Rechtshänder höhere interhemisphärische Kohärenzen als die Männer.

Ein Faktor für die teilweise unterschiedlichen Ergebnisse der vorliegenden Studie zu der oben beschriebenen Studie von Duffy et al. könnten die Fallzahlen sein. Diese waren bei den Untersuchungen der vorliegenden Studie für beide Händigkeitsgruppen gleich groß (je N=46), während Duffy et al. eine deutlich kleinere Population der Linkshänder (N=21) gegenüber der der Rechtshänder (N=42) betrachtete. Des Weiteren befanden

sich die Versuchspersonen in der Studie von Duffy et al. in einem Alter zwischen 20 und 80 Jahren. Das Alter unserer Versuchspersonen hingegen blieb auf das „junge Erwachsenenalter“ beschränkt. Duffy et al. machten keine genaueren Angaben über eventuelle Altersunterschiede zwischen den einzelnen Untergruppen (rechthändige Frauen, rechtshändige Männer, linkshändige Männer, linkshändige Frauen). Vermutungen über altersbedingte Kohärenzeffekte sind also rein spekulativ, könnten aber auch einen Beitrag geleistet haben. Dieser Effekt, der allerdings mittels weitaus höherer (N=371) Probandenzahlen untersucht worden war, wurde von Duffy et al. (1996) selbst in einem anderen Teil derselben Veröffentlichung beschrieben.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie und die in der Literatur beschriebenen geschlechts- und händigkeitsabhängigen Unterschiede in der hemisphärischen Lateralität, in kognitiven Strategien sowie in der Höhe der interhemisphärischen Kohärenzen geben zumindest Anlass zu der Vermutung, dass ein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern Geschlecht und Händigkeit besteht.

6.2.3 Die interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in Abhängigkeit von der Händigkeit

Zunächst muss kritisch bemerkt werden, dass händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen in der vorliegenden Studie lediglich als sekundäre Zielparameter betrachtet wurden. Die gefundenen Hinweise auf mögliche händigkeitsabhängige Unterschiede in den Kohärenzwerten bedürfen daher weiterer Untersuchungen.

Die Kohärenzen wurden in der vorliegenden Studie für Elektrodenpaare berechnet, welche die Hemisphären frontal, zentral, parietal und okzipital „verbanden“. Es wurden etwas höhere interhemisphärische Kohärenzen im Alphaband frontal bei den Linkshändern und in den Beta-Bändern zentral und parietal bei den Rechtshändern gefunden. Möglicherweise ist dies ein Hinweis auf eine unterschiedliche Konnektivität der verschiedenen durch das Corpus Callosum verbundenen Hemisphärenareale in Abhängigkeit von der Händigkeit. Diese Vermutung würde Studien unterstützen, in denen unterschiedliche händigkeitsabhängige Beziehungen verschiedener Regionen des Corpus Callosum zu den zerebralen Asymmetrien gefunden wurden (Luders et al., 2003).

Galaburda et al. wiesen bereits 1978 darauf hin, dass höhere Kohärenzen für eine vergleichsweise stärkere Faserkonnektivität zwischen zwei Arealen spreche, wodurch ein effizienterer Informationsaustausch möglich werde. Die vorliegenden Daten können Studien, die eine stärkere Faserkonnektivität zwischen den Hemisphären bei den Linkshändern postulierten, weder bestätigen noch widerlegen.

Letztendlich dürfen wir nicht vergessen, dass die Händigkeit nicht mehr als ein indirekter und labiler Indikator der anatomischen Asymmetrien der Hemisphären ist. Allerdings ist die Händigkeit auch die am stärksten evidente motorische Asymmetrie des Menschen. Die Asymmetrie des motorischen Systems könnte die Präferenz einer Hand begründen, es könnte aber auch umgekehrt sein (Foundas et al., 1998).

In vielen Arbeiten wurde die Händigkeit zur Erforschung der hemisphärischen Asymmetrie herangezogen. Die Händigkeit ist jedoch selbst ein wichtiges Thema. Es ist bisher nicht gelungen, einen reproduzierbaren kausalen Zusammenhang mit neuropsychologischen Konzepten zu beweisen (Beaumont et al., 1997). Händigkeit und kortikale Lateralität sind nicht dasselbe, auch wenn sie möglicherweise ein Ausdruck gemeinsamer zugrunde liegender Prozesse sind. Eine wichtige Aufgabe zukünftiger Forschung wird es sein, ein genaues Modell lateralisierter kognitiver Strukturen zu entwickeln, das alle Asymmetrien (wie z.B. die Händigkeit) genau erklären kann.

Die vorliegende Studie ergab des Weiteren Hinweise darauf, dass die möglichen händigkeitsabhängigen Unterschiede, die in den interhemisphärischen Kohärenzwerten der gesamten Stichprobe (also ohne Unterteilung in Männer oder Frauen) gefunden wurden, maßgeblich von der Gruppe der Frauen beeinflusst wurden. Die Hinweise auf händigkeitsabhängige Unterschiede traten in der Untergruppe der Frauen trotz niedrigerer Fallzahl sogar deutlicher hervor als in der Gruppe der gesamten Stichprobe. Hingegen waren in der Untergruppe der Männer gar keine Trends händigkeitsabhängiger Unterschiede zu finden.

Ein Zusammenhang der kortikalen Asymmetrie bzw. Lateralisation mit der Händigkeit oder dem Geschlecht ist wiederholt postuliert worden. Amunts et al. (2000) fanden mittels magnetresonanztomographischer Untersuchungen heraus, dass anatomische Asymmetrien bei Männern (gemessen an der Tiefe des zentralen Sulcus der linken Hemisphäre) bei rechtshändigen Männern am größten, bei beidhändigen Männern geringer und bei linkshändigen Männern am geringsten waren. Bei Frauen waren die interhemisphärischen Asymmetrien nicht abhängig von der Händigkeit. Die

anatomische Asymmetrie der Hemisphären war also nur bei den Männern mit der Händigkeit assoziiert (Amunts et al., 2000).

Bei einer stärker ausgeprägten kortikalen Asymmetrie der rechtshändigen Männer wären ein weniger stark ausgeprägter interhemisphärischer Transfer und niedrigere Kohärenzen als bei den linkshändigen Männern zu erwarten gewesen. In der vorliegenden Studie fanden sich jedoch keine händigkeitsabhängigen Unterschiede der interhemisphärischen Kohärenzen bei den Männern, die das bestätigen könnten. Hingegen fand sich bei den Frauen eine größere Anzahl etwas höherer interhemisphärischer Kohärenzen für die linkshändigen Frauen im Vergleich zu den rechtshändigen Frauen. Amunts et al. (2000) hatten jedoch für die Frauen keine Assoziation der kortikalen Asymmetrie mit der Händigkeit gefunden.

An dieser Stelle bleibt die Frage offen, ob die interhemisphärischen Kohärenzen von der *Ausprägung* der jeweiligen Händigkeit abhängig sind. In der vorliegenden Versuchsanordnung wurde weder nach Händigkeitsausprägung innerhalb einer Händigkeitsgruppe differenziert noch wurden Extremgruppenvergleiche angestellt, da die Fallzahlen in diesen Gruppen extrem ausgeprägter Links- oder Rechtshändigkeit zu gering ausgefallen wären.

Die hier mittels sekundärer Zielparameter gefundenen Hinweise auf eventuelle händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen während nonverbaler Belastung können zukünftigen Arbeiten zur Formulierung von Hypothesen dienen, die es zu überprüfen gilt.

6.2.4 Weitere Aspekte der interhemisphärischen EEG-Kohärenzen unter Berücksichtigung der nonverbalen Testwerte

Während der Ableitung der EEG-Daten hatten die Probanden den LPS-3-Untertest zu lösen. Dieser ist rein nonverbaler Natur, was den Vorteil einer weitgehend bildungsunabhängigen Intelligenztestung mit sich bringt. So konnte eine Beeinflussung der Testergebnisse durch Sprachverständnis (z.B. Nicht-Muttersprachler) und Wortschatz in Abhängigkeit von Bildungsschwerpunkten (z.B. unterschiedliche Studienfächer) vernachlässigt werden, die bei einem verbalen Test zu finden gewesen wäre.

Die Testwerte der Probanden wurden als sekundäre Zielparameter betrachtet, um eventuelle starke geschlechts- oder händigkeitsabhängige Unterschiede in den Leistungen aufzudecken. Deutliche Unterschiede in der nonverbalen Intelligenz zwischen Männern und Frauen bzw. Links- und Rechtshändern hätten den interhemisphärischen Transfer beeinflussen können.

Bei der Auswertung des nonverbalen Tests zeigten sich in Abhängigkeit vom Geschlecht keine Unterschiede in den erreichten Testwerten. Die von Crucian et al. (1998) und Roberts et al. (2000) beschriebene Benachteiligung von Frauen gegenüber Männern bei solchen nonverbalen Aufgabenstellungen konnte, zumindest für die Gruppe der gesamten Stichprobe (Linkshänder *und* Rechtshänder), nicht bestätigt werden. Lediglich in der Untergruppe der Linkshänder erreichten die Frauen in der vorliegenden Studie geringfügig niedrigere Punktwerte als die Männer. Ob ein kausaler Zusammenhang zwischen niedrigerem nonverbalem Leistungsvermögen und erhöhten interhemisphärischen Kohärenzen besteht, bleibt deshalb fraglich.

Verschiedene Autoren postulierten einen Zusammenhang zwischen kognitiver Leistungsfähigkeit und interhemisphärischem Informationsaustausch. Müller (2003) deutete die Assoziation zwischen überdurchschnittlichen verbalen und nonverbalen Fähigkeiten und besserer intermanueller Koordination als Ausdruck einer effektiveren interhemisphärischen Kooperation. Rappelsberger und Petsche (1988) stellten eine erhöhte Kopplung zwischen den Hemisphären während räumlich-visueller Aufgabenstellungen (imaginärer Würfelrotation) fest. Dies äußerte sich in erhöhten parietalen interhemisphärischen Kohärenzen. Petsche (1995) wies zudem ipsi- und contralateral eine Zunahme der EEG-Kohärenzen während kreativer verbaler, visueller und musikalischer Denkprozesse nach. Den Zusammenhang zwischen EEG-Kohärenzen und dem Abschneiden in Intelligenztests untersuchten Jausovec und Jausovec (2000) an 115 Studenten: höhere Intelligenzwerte gingen mit zunehmenden ipsi- und contralateralen Kohärenzen einher.

1969 postulierte Levy für Linkshänder eine Unterlegenheit in nonverbalen Aufgabenstellungen. Levys Arbeit folgte eine Reihe von Studien, welche eine solche Unterlegenheit in nonverbalen Leistungen bei Linkshändern verglichen mit Rechtshändern nicht bestätigen konnten oder sogar widerlegten. Die bisherigen Forschungsergebnisse machen insgesamt eher eine Überlegenheit der Linkshänder verglichen mit den Rechtshändern in nonverbalen Leistungen wahrscheinlich (Annett, 1985, 1992, 1993 und 1996; Whittington et al., 1991; Geschwind und Galaburda, 1985).

In der vorliegenden Studie fanden sich jedoch geringfügig niedrigere Testwerte bei den Linkshändern als bei den Rechtshändern.

Da die Testergebnisse (C-Werte des nonverbalen Untertests-3 des LPS) allerdings lediglich als sekundäre Zielparameter auf mögliche geschlechts- und händigkeitsabhängige Unterschiede untersucht wurden, können die Ergebnisse bestenfalls als Hinweise auf mögliche Unterschiede gewertet werden. Deshalb kann ein händigkeitsabhängiger Unterschied bei nonverbalen Leistungen durch die vorliegenden Ergebnisse weder bestätigt noch widerlegt werden.

Insgesamt fielen die Unterschiede in den nonverbalen Testwerten zwischen den einzelnen Untergruppen sehr gering aus und können vernachlässigt werden. Unterschiedliche nonverbale Fähigkeiten dürften auf die gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen unter Berücksichtigung der Händigkeit keinen Einfluss gehabt haben.

6.3 Kritische Bemerkungen zu den angewandten Methoden und einige Ausblicke für die zukünftige Forschung

Den gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschieden liegt die Auswertung der EEG-Kohärenzen während der Bearbeitung eines nonverbalen Tests zugrunde. Zusätzliche EEG-Aufzeichnungen während der Lösung eines verbalen Tests und während einer Ruhephase wären für zukünftige Studien wünschenswert. Hierdurch könnten die Ergebnisse auch für die verbale Belastung überprüft und möglicherweise bestätigt werden.

Des Weiteren wäre es interessant, die interhemisphärischen Kohärenzen während verbaler und nonverbaler kognitiver Belastung zu den interhemisphärischen Kohärenzen während einer Ruhephase (also ohne kognitive Belastung) in Beziehung zu setzen. Es wäre günstig, Differenzen zwischen den Kohärenzwerten (Kognition - Ruhe) zu bilden. Hierdurch könnten händigkeits- und geschlechtsabhängige Unterschiede besser sichtbar werden. Möglicherweise steigen die interhemisphärischen Kohärenzen während nonverbaler kognitiver Belastung im Vergleich zur Ruhephase bei Rechtshändern besonders im Beta-Frequenzbereich an, während sie bei Linkshändern weniger ansteigen oder sogar absinken. Dies würde die Ergebnisse früherer Studien bestätigen (Shaw et al., 1978, 1981 und 1983).

Siebner et al. (2002) postulierten einen (die Umschulung von Linkshändern zur Benutzung der rechten Hand überdauernden) Unterschied der hemisphärischen Asymmetrien von ursprünglichen Linkshändern im Vergleich zu ursprünglichen Rechtshändern. Eine Zuordnung „umgeschulter“ Linkshänder zur rechtshändigen Gruppe hätte die Ergebnisse verfälschen können. Um dies zu vermeiden, wurden die Probanden der vorliegenden Studie bei der Einordnung ihrer Händigkeit nach einer möglichen Umschulung befragt. Es wurden nur die umgeschulten Linkshänder in die Studie eingeschlossen, die zwar beispielsweise mit der rechten Hand schrieben, aber anhand des ermittelten Lateralitätsquotienten weiterhin der Linkshändergruppe zuzuordnen waren. Ursprüngliche Linkshänder, die nach einer Umschulung den überwiegenden Teil der Tätigkeiten mit rechts ausführten, wurden nicht eingeschlossen. In der Vergangenheit ist häufig vermutet worden, dass die Umschulung von Linkshändern zu einer kognitiven Beeinträchtigung führen kann. Dies könnte ein gehäuftes Auftreten von Lese-Rechtschreib-Schwäche und Stottern bei Linkshändern zumindest teilweise erklären (Geschwind und Galaburda, 1985; Annett, 1996).

Deshalb wäre es interessant, zwischen umgeschulten und nicht umgeschulten Linkshändern zu unterscheiden, da sich eine kognitive Beeinträchtigung anhand veränderter EEG-Kohärenzen möglicherweise belegen ließe. Solche kognitiven Beeinträchtigungen bei linkshändigen Probanden könnten zu Kohärenzunterschieden beigetragen haben.

Die beschriebenen Ergebnisse treffen aufgrund der Kriterien bei der Probandenauswahl für eine bestimmte Bildungsschicht zu. Diese hat die erlangte Hochschulreife als gemeinsames Merkmal. Hierdurch konnten unterschiedliche Bildungseinflüsse der Probanden auf die Kohärenzen während nonverbaler Belastung im Wesentlichen vernachlässigt werden. Ein Zusammenhang von Kohärenzen und Intelligenz wurde wiederholt postuliert (Thatcher et al., 1983; Jiang und Zheng, 2006). Deshalb wären Vergleiche zu anderen Bildungsschichten ein interessantes Forschungsfeld für die Zukunft. Erhöhte Kohärenzen wurden unter anderem als Zeichen einer Kompensation im Sinne eines höheren kognitiven Aufwandes gewertet (Jiang und Zheng, 2006). Es bleibt nachzuprüfen, ob in niedrigeren Bildungsschichten höhere Kohärenzwerte zu verzeichnen sind als in höheren Bildungsschichten, und ob die gefundenen geschlechtsabhängigen Unterschiede in den Kohärenzwerten hiervon unbeeinflusst bleiben.

Weiterhin wäre es interessant, die Probanden bei ähnlicher Versuchsanordnung und entsprechend höherer Fallzahl hinsichtlich ihrer intellektuellen Fähigkeiten genauer zu differenzieren. Bekanntlich gibt es bezüglich der intellektuellen Fähigkeiten innerhalb der Linkshändergruppe verglichen mit der Rechtshändergruppe große Variationen (Noroozian et al., 2002).

In der vorliegenden Studie wurde leider innerhalb der Einschlusskriterien für die Bildung nicht noch einmal zwischen einzelnen Studienfächern differenziert. Studenten der Medizin wurden ebenso eingeschlossen wie Studenten der Physik, der Philosophie oder der Künste. Wie im Vorfeld beschrieben, wurde ein Zusammenhang zwischen Begabung und Händigkeit einerseits (Geschwind und Galaburda 1985; Annett und Manning, 1990; Schott, 1995) sowie Begabung und Geschlecht andererseits (Benbow, 1988; Russo et al., 2000) postuliert. Bei entsprechend höheren Fallzahlen wäre unter Berücksichtigung dieser Faktoren eine Differenzierung der Studienfächer für zukünftige Untersuchungen sinnvoll.

6.4 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Studie wurden während der Bearbeitung eines nonverbalen Tests in allen sechs Frequenzbändern deutlich höhere interhemisphärische Kohärenzen bei den Frauen als bei den Männern gefunden.

Zu den signifikanten geschlechtsabhängigen Unterschieden in den interhemisphärischen Kohärenzen trugen die Linkshänder stärker als die Rechtshänder bei. Dies wäre bei der Untersuchung der gesamten Stichprobe auf geschlechtsabhängige Unterschiede ohne Berücksichtigung der Händigkeit nicht aufgefallen.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie und bisheriger Veröffentlichungen kann geschlussfolgert werden, dass Frauen stets höhere Kohärenzen als Männer aufweisen, und zwar sowohl unter Ruhebedingungen als auch während verbaler und nonverbaler Belastung. Dies spricht für geschlechtsabhängige Unterschiede in der kortikalen Organisation sowie im interhemisphärischen Transfer.

Nach den Ergebnissen der Literatur sollen Frauen in den verbalen Fähigkeiten, Männer hingegen in den nonverbalen Fähigkeiten überlegen sein. Geschlechtsabhängige Unterschiede in den Begabungen scheinen also nicht in einfach kausaler Beziehung zu den Kohärenzen zu stehen.

Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen Geschlecht, Händigkeit und intellektueller Begabung. Die drei Parameter könnten durch gemeinsame zugrunde liegende Faktoren beeinflusst werden. Der derzeitige Stand der Forschung impliziert die Möglichkeit, dass ein Mechanismus auf genetischer Ebene die zerebrale Lateralität beeinflusst. Ein geschlechtsspezifisches Gen könnte möglicherweise für die geschlechtsabhängigen Unterschiede eine Rolle spielen, die sowohl bei verbalen und nonverbalen Fähigkeiten als auch bei der Lateralisation gefunden wurden. Dies könnte auch geschlechts- und händigkeitsabhängige Unterschiede erklären, die bei verschiedenen Krankheitsbildern, wie z.B. den Psychosen, auftreten.

Interhemisphärische EEG-Kohärenzen sind ein wichtiges nichtinvasives Mittel zur Quantifizierung funktioneller Beziehungen zwischen den Hemisphären und können Unterschiede in der zerebralen Lateralisation erfassen. Die in der vorliegenden Studie gefundenen höheren interhemisphärischen Kohärenzen bei Frauen in allen

Frequenzbändern unterstützen die Annahme, dass Frauen ein weniger lateralisiertes Gehirn haben als Männer.

Für die einzelnen geschlechts- und/oder händigkeitsabhängigen Untergruppen einer Probandenpopulation sollten differenzierte Normwerte der EEG-Kohärenzen definiert werden.

Die Nutzbarkeit der Kohärenz als Werkzeug zur Diagnostik und Früherkennung neuropsychiatrischer Erkrankungen steht und fällt mit ihrer Vergleichbarkeit zu gesunden Individuen. Nur wenn wir über Kohärenzwerte gesunder Probandengruppen ausreichend Bescheid wissen, können wir Veränderungen der EEG-Kohärenzen (beispielsweise bei Kranken) sicher erkennen und deuten.

7 Zusammenfassung

Interhemisphärische EEG-Kohärenzen sind ein wichtiges nichtinvasives Mittel zur Darstellung funktioneller Beziehungen zwischen den Hemisphären und können Unterschiede in der zerebralen Lateralisation erfassen.

Als primäre Zielparameter wurden geschlechtsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen während nonverbaler Belastung untersucht. Es wurde die Hypothese formuliert, dass Frauen höhere interhemisphärische Kohärenzen als Männer aufweisen. Sekundäre Zielparameter waren händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen sowie geschlechts- und händigkeitsabhängige Unterschiede in den nonverbalen Leistungen.

Es wurden 92 gesunde Versuchspersonen (je 23 linkshändige Männer, rechtshändige Männer, linkshändige Frauen und rechtshändige Frauen) im Alter von 18 bis 30 Jahren rekrutiert. Die Händigkeit wurde mithilfe des Edinburgh-Händigkeitsinventars ermittelt. Die Ableitung des EEGs erfolgte während der Bearbeitung des nonverbalen Untertests-3 des Leistungsprüfsystems nach Horn. Es wurden für sechs Frequenzbänder (Delta, Theta, Alpha, Beta1, Beta2, Beta3) jeweils vier interhemisphärische Kohärenzen betrachtet: frontal F3F4, zentral C3C4, parietal P3P4 und okzipital O1O2.

Bei den Frauen fanden sich in allen sechs Frequenzbändern signifikant höhere interhemisphärische Kohärenzen als bei den Männern. Die geschlechtsabhängigen Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen wurden maßgeblich durch die Gruppe der Linkshänder beeinflusst.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie und bisheriger Veröffentlichungen kann geschlossen werden, dass Frauen sowohl unter Ruhebedingungen als auch während verbaler und nonverbaler Belastung höhere Kohärenzwerte aufweisen als Männer. Dies spricht für geschlechtsabhängige Unterschiede in der kortikalen Organisation sowie im interhemisphärischen Transfer. Die Ergebnisse unterstützen die Annahme, dass Frauen ein weniger lateralisiertes Gehirn haben als Männer.

Die nonverbalen Testwerte unterschieden sich nicht in Abhängigkeit von Geschlecht oder Händigkeit. Es wurden Hinweise auf händigkeitsabhängige Unterschiede in den interhemisphärischen Kohärenzen gefunden, welche weiter abgeklärt werden müssen.

Einflüsse des Geschlechts und der Händigkeit müssen bei der Auswahl von Probanden beachtet werden. In Abhängigkeit von Geschlecht und Händigkeit sollten individuelle Normwerte für EEG-Kohärenzen definiert werden.

8 Literaturverzeichnis

Alexander GM, Altemus M, Peterson BS et al. Replication of a premenstrual decrease in right-ear advantage on language-related dichotic listening tests of cerebral laterality. *Neuropsychologia* 2002;40:1293-9.

Amunts K, Jancke L, Mohlberg H et al. Interhemispheric asymmetry of the human motor cortex related to handedness and gender. *Neuropsychologia* 2000;38:304-12.

Amunts K, Schmidt-Passos F, Schleicher A, Zilles K. Postnatal development of interhemispheric asymmetry in the cytoarchitecture of human area 4. *Anatomy and Embryology* 1997;196:393-402.

Annett M. *Left, right, hand and brain: The right shift theory*. London: Lawrence Erlbaum Associates, 1985.

Annett M. Laterality and cerebral dominance. *Journal of child psychology and psychiatry, and allied disciplines* 1991;32:219-32.

Annett M. Spatial ability in subgroups of left- and right-handers. *British journal of psychology* 1992;83:493-515.

Annett M. The disadvantage of dexterity for intelligence-corrected findings. *British journal of psychology* 1993;84:511-6.

Annett M. Laterality and types of dyslexia. *Neuroscience and biobehavioral reviews* 1996;20:631-6.

Annett M, Manning M. Arithmetic and laterality. *Neuropsychologia* 1990;28:61-9.

Atkinson DS. Midsagittal corpus callosum area, intelligence, and language dominance in epilepsy. *Journal of neuroimaging* 1996;6:235-9.

Barry RJ, Clarke AR, McCarthy R et al. Age and gender effects in EEG coherence: I. Developmental trends in normal children. *Clinical neurophysiology* 2004;115:2252-8.

Beaumont JG. Future research directions in laterality. *Neuropsychology review* 1997;7:107-26.

Benbow CP. Sex differences in mathematical reasoning ability in intellectually talented preadolescents: Their nature, effects, and possible causes. *The Behavioral and brain sciences* 1988;11:169-232.

Bol P, Scheirs J, Spanjaard L. Meningitis and the evolution of dominance of righthandedness. *Cortex* 1997;33:723-32.

Bryden MP, McManus IC, Bulman-Fleming MB. Evaluating the empirical support for the Geschwind-Behan-Galaburda model of cerebral lateralization. *Brain and cognition* 1994;26:103-67.

Christman SD. Handedness in musicians: Bimanual constraints on performance. *Brain and cognition* 1993;22:266-72.

Christman SD. Individual differences in stroop and local-global processing: a possible role of interhemispheric interaction. *Brain and cognition* 2001;45:97-118.

Coney J. Lateral Asymmetry in phonological processing: relating behavioral measures to neuroimaged structures. *Brain and language* 2002;80:355-65.

Cook ND. Callosal inhibition: The key to the brain code. *Behavioral science* 1984;29:98-110.

Cook ND, Brugger P, Regard M et al. On the role of the corpus callosum in cerebral laterality: A comment on Lassonde, Bryden, and Demers. *Brain and language* 1990;39:471-81.

Corballis MC. From mouth to hand: Gesture, speech, and the evolution of right-handedness. *The Behavioral and brain sciences* 2003;26:199-260.

Coren S. Differences in divergent thinking as a function of handedness and sex. *The American journal of psychology* 1995;108:311-25.

Cowell PE, Allen LS, Zalatimo NS, Denenberg VH. A developmental study of sex and age interactions in the human corpus callosum. *Brain research. Developmental brain research* 1992;66:187-92.

Cranberg LD, Albert ML. The Chess Mind. In: Obler LK, Fein D, eds. *The Exceptional Brain*. New York: 1988:156-90.

Crow TJ. Commentary on Annett, Yeo et al., Klar, Saugstad and Orr: cerebral asymmetry, language and psychosis - the case for a homo sapiens-specific sex-linked gene for brain growth. *Schizophrenia research* 1999;39:219-31.

Crow TJ. The genetics of cerebral asymmetry and the structure of language - what's the alternative? An organizer's viewpoint. *Schizophrenia research* 2000;46:73-6.

Crow TJ. Handedness, language lateralisation and anatomical asymmetry: relevance of protocadherinXY to hominid speciation and the aetiology of psychosis. Point of view. *The British journal of psychiatry* 2002;181:295-7.

Crucian GP, Berenbaum SA. Sex differences in right hemisphere tasks. *Brain and cognition* 1998;36:377-89.

Dassonville P, Zhu X-H, Ugurbil K et al. Functional activation in motor cortex reflects the direction and the degree of handedness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 1997;94:14015-8.

Demura S, Tada N, Matsuzawa J et al. The influence of gender, athletic events, and athletic experience on the subjective dominant hand and the determination of the dominant hand based on the Laterality Quotient (LQ) and the validity of the LQ. *Journal of physiological anthropology* 2006;25:321-9.

Denenberg VH, Kertesz A, Cowell PE. A factor analysis of the human's corpus callosum. *Brain research* 1991;548:126-132.

Doody RS, Vacca JL, Massman PJ, Liao TY. The influence of handedness on the clinical presentation and neuropsychology of Alzheimer disease. *Archives of neurology* 1999;56:1133-7.

Drayna D, Kilshaw J, Kelly J. The sex ratio in familial persistent stuttering. *American journal of human genetics* 1999;65:1473-5.

Duffy FH, McAnulty GB, Albert MS. Effects of age upon interhemispheric coherence in normal adults. *Neurobiology of aging* 1996;17:587-99.

Faurie C, Raymond M. Handedness frequency over more than ten thousand years. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society* 2004;271:43-5.

Flannery KA, Liederman J, Daly L, Schultz J. Male prevalence for reading disability is found in a large sample of black and white children free from ascertainment bias. *Journal of the International Neuropsychological Society* 2000;6:433-42.

Ford MR, Goethe JW, Dekker DK. EEG Coherence and power changes during a continuous movement task. *International journal of psychophysiology* 1986;4:99-110.

Foundas AL, Hong K, Leonard CM, Heilman KM. Hand preference and magnetic resonance imaging asymmetries of the central sulcus. *Neuropsychiatry, neuropsychology, and behavioral neurology* 1998;11:65-71.

Foundas AL, Leonard CM, Hanna-Pladdy B. Variability in the anatomy of the planum temporale and posterior ascending ramus: do right and left-handers differ? *Brain and language* 2002;83:403-24.

French CC, Beaumont JG. A critical review of EEG coherence studies of hemisphere function. *International journal of psychophysiology* 1984;1:241-54.

Fry CJ. Left-handedness: Association with college major, familial sinistrality, allergies, and asthma. *Psychological reports* 1990;67:419-33.

Galaburda AM, LeMay M, Kemper TL, Geschwind N. Right-left asymmetries in the brain. *Science* 1978;199:852-6.

Galobardes B, Bernstein MS, Morabia A. The association between switching hand preference and the declining prevalence of left-handedness with age. *American journal of public health* 1999;89:1873-5.

Geschwind N, Galaburda AM. Cerebral lateralization; biological mechanisms, associations, and pathology: I A hypothesis and a program for research. *Archives of neurology* 1985;42:428-59.

Geschwind N, Galaburda AM. Cerebral lateralization; biological mechanisms, associations, and pathology: II A hypothesis and a program for research. *Archives of neurology* 1985;42:521-52.

Giedd JN, Rumsey JM, Castellanos FX et al. A quantitative MRI study of the corpus callosum in children and adolescents. *Brain research. Developmental brain research* 1996;91:274-80.

Gorynia I, Egenter D. Intermanual coordination in relation to handedness, familial sinistrality and lateral preferences. *Cortex* 2000;36:1-18.

Götestam KO. Lefthandedness among students of architecture and music. *Perceptual and motor skills* 1990;70:1323-7.

Gur RC, Packer IK, Hungerbuhler JP et al. Differences in the distribution of gray and white matter in human cerebral hemispheres. *Science* 1980;207:1226-8.

Harris LJ. Cultural influences on handedness: Historical and contemporary theory and evidence. North-Holland: Elsevier Science Publishers, 1990.

Hausmann M, Slabbekoorn D, van Goozen SH et al. Sex hormones affect spatial abilities during the menstrual cycle. *Behavioral neuroscience* 2000;114:1245-50.

Haut KM, Barch DM. Sex influences on material-sensitive functional lateralization in working and episodic memory: men and women are not all that different. *NeuroImage* 2006;32:411-22.

Henderson NJ, Stephens CD, Gale D. Left-handedness in dental undergraduates and orthodontic specialists. *British dental journal* 1996;181:285-8.

Holtzen DW. Handedness and professional tennis. *The International journal of neuroscience* 2000;105:101-19.

Horn W. Leistungsprüfsystem LPS Handanweisung für die Durchführung, Auswertung und Interpretation. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie, 1962.

Jaspers K. The physician in the technical age. *Klinische Wochenschrift* 1958;36:1037-43.

Jausovec N, Jausovec K. Differences in resting EEG related to ability. *Brain topography* 2000;12:229-41.

Jeeves MA, Moes P. Interhemispheric transfer time differences related to aging and gender. *Neuropsychologia* 1996;34:627-36.

Jeret JS et al. Clinicopathological findings associated with agenesis of the corpus callosum. *Brain & development* 1987;9:255-64.

Jiang Z-Y, Zheng L-I. Inter- and intra-hemispheric EEG coherence in patients with mild cognitive impairment at rest and during working memory task. *Journal of Zhejiang University. Science* 2006;7:357-64.

Kieler H, Cnattingius S, Haglund B et al. Sinistrality - a side effect of prenatal sonography: a comparative study of young men. *Epidemiology* 2001;12:618-23.

Klar AJS. Genetic models for handedness, brain lateralization, schizophrenia, and manic-depression. *Schizophrenia research* 1999;39:207-18.

Knecht S, Dräger B, Deppe M et al. Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain* 2000;123:2512-8.

Kuks JBM, Vos JE, O'Brien MJ. Coherence patterns of the infant sleep EEG in absence of the corpus callosum. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1987;66:8-14.

Laval SH, Dann JC, Butler RJ et al. Evidence for linkage to psychosis and cerebral asymmetry (relative hand skill) on the X chromosome. *American journal of medical genetics. Part B, Neuropsychiatric genetics* 1998;81:420-7.

Levy J. Possible basis for the evolution of lateral specialisation of the human brain. *Nature* 1969;224:614-5.

Luders E, Narr KL, Zaidel E et al. Gender effects on callosal thickness in scaled and unscaled space. *Neuroreport* 2006;17:1103-6.

Luders E, Rex DE, Narr KL et al. Relationships between sulcal asymmetries and corpus callosum size: Gender and handedness effects. *Cerebral cortex* 2003;13:1084-93.

Mann K, Maier W, Franke P et al. Intra- and interhemispheric electroencephalogram coherence in siblings discordant for schizophrenia and healthy volunteers. *Biological psychiatry* 1997;42:655-63.

Marosi E, Harmony T, Becker J et al. Sex differences in EEG coherence in normal children. *The International journal of neuroscience* 1993;72:115-21.

Marosi E, Harmony T, Sanchez L et al. Maturation of the coherence of EEG activity in normal and learning-disabled children. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1992;83:350-7.

Martino G, Winner E. Talents and Disorders: Relationships among handedness, sex, and college major. *Brain and cognition* 1995;29:66-84.

Masuhr KF, Neumann M. *Neurologie*. Stuttgart: Hippokrates Verlag, 1996.

McManus IC. Pathological left-handedness: does it exist? *Journal of communication disorders* 1983;16:315-44.

McManus IC. The inheritance of left-handedness. *Ciba Foundation Symposium* 1991;162:251-81.

McManus IC, Shergill S, Bryden MP. Annett's theory that individuals heterozygous for the right shift gene are intellectually advantaged: Theoretical and empirical problems. *British journal of psychology* 1993;84:517-37.

Moffat SD, Hampson E, Lee DH. Morphology of the planum temporale and corpus callosum in left handers with evidence of left and right hemisphere speech representation. *Brain* 1998;121:2369-79.

Morfit NS, Weekes NY. Handedness and immune function. *Brain and cognition* 2001;46:209-13.

Mulligan J, Stratford RJ, Bailey BJ et al. Hormones and handedness. *Hormone research* 2001;56:51-7.

Müller J. Beziehungen zwischen ausgewählten Parametern der Motorik und kognitiven Fähigkeiten. Dissertation. Humboldt Universität Berlin 2003; 66.

Nalcaci E, Kalaycioglu C, Cicek M, Genc Y. The relationship between handedness and fine motor performance. *Cortex* 2001;37:493-500.

Neundörfer B. EEG-Fibel. München, Jena: Urban und Fischer, 2002.

Niebauer CL. Handedness and the fringe of consciousness: strong handers ruminate while mixed handers self-reflect. *Consciousness and cognition* 2004;13:730-45.

Noroozian M, Letfit J, Gessemzadeh H et al. Academic achievement and learning abilities in left-handers: guilt or gift? *Cortex* 2002;38:779-85.

Nunez PL, Srinivasan R, Westorp AF et al. EEG coherency I: statistics, reference electrode, volume conduction, Laplacians, cortical imaging, and interpretation at multiple scales. *Electroencephalography and clinical neurophysiology* 1997;103:499-515.

O'Boyle MW, Benbow CP. Enhanced right hemisphere involvement during cognitive processing may relate to intellectual precocity. *Neuropsychologia* 1990;28:211-6.

O'Boyle MW, Benbow CP. Handedness and its relationship to talent and ability. In: Coren S, ed. *Left-handedness: Behavioral Implications and Anomalies*. North-Holland, 1990.

O'Boyle MW, Gill HS, Alexander JE. Concurrent finger-tapping in mathematical gifted males: evidence for enhanced right hemisphere involvement during linguistic processing. *Cortex* 1994;30:519-26.

O'Callaghan MJ, Burn YR, Mohay HA et al. The prevalence and origins of left hand preference in high risk infants, and its implications for intellectual, motor and behavioural performance at four and six years. *Cortex* 1993;29:617-27.

O'Callaghan MJ, Burn YR, Mohay HA et al. Handedness in extremely low birth weight infants: aetiology and relationship to intellectual abilities, motor performance and behaviour at four and six years. *Cortex* 1993;29:629-37.

Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97-113.

Petsche H. Approaches to verbal, visual, and musical creativity by EEG coherence analysis. *International journal of psychophysiology* 1995;24:145-59.

Pipe ME. Pathological left-handedness: is it familial? *Neuropsychologia* 1987;25:571-7.

Pizamiglio L, Mammucari A. Evidence for sex differences in brain organization in recovery in aphasia. *Brain and language* 1985;25:213-223.

Pogarell O, Teipel SJ, Juckel G et al. EEG coherence reflects regional corpus callosum area in Alzheimer's disease. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry* 2005;76:109-11.

Pogun S. Sex differences in brain and behavior: emphasis on nicotine, nitric oxide, and place learning. *International journal of psychophysiology* 2001;42:195-208.

Portellano JA, Torrijos S, Martinez-Arias R, Vale P. Cognitive performance of right-handed and left-handed persons on the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-III). *Revista de neurologia* 2006;42:73-6.

Pujol J, Vendrell P, Junqué C et al. When does human brain development end? Evidence of corpus callosum growth up to adulthood. *Annals of neurology* 1993;34:71-4.

Rappelsberger P, Lacroix D, Petsche H. Amplitude and coherence mapping: Its application in psycho- and patho-physiological studies. In: Rother M, Zwiener U, eds. Quantitative EEG analysis - clinical utility and new methods. Jena: Universitätsverlag GmbH, 1993:179-86.

Rappelsberger P, Petsche H. Probability mapping: power and coherence analyses of cognitive processes. Brain topography 1988;1:46-54.

Rappelsberger P, Sühlfleisch U. Coherence analysis: A method to reveal functional cortical relations. Brain topography 2000;12:293.

Razumnikova OM, Vol'f NV. Gender differences in hemispheric interaction during distributed and directed attention. Zhurnal vyssheĭ nervnoĭ deiatelnosti imeni I P Pavlova 2006;56:327-33.

Reiss M. Zur Lateralität bei Zwillingen. Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 1996;81:141-55.

Reiss M, Reiss G. Aktuelle Aspekte der Händigkeit. Wiener klinische Wochenschrift 1999;111:1009-18.

Reiss M, Reiss G. Medizinische Probleme der Händigkeit. Wiener medizinische Wochenschrift 2002;152:148-52.

Roberts JE, Bell MA. Sex differences on a mental rotation task: variations in electroencephalogram hemispheric activation between children and college students. Developmental neuropsychology 2000;17:199-223.

Russo P, Persegani C, Papeschi LL et al. Sex differences in hemisphere preference as assessed by paper and pencil test. The International journal of neuroscience 2000;100:29-37.

Sanders G, Sjodin M, de Chastelaine M. On the elusive nature of sex differences in cognition: Hormonal influence contributing to within-sex variation. *Archives of sexual behavior* 2002;31:145-52.

Schott J, Puttick M. Handedness among surgeons. *BMJ* Mar 18 1995;309(6970):739.

Segal NL. Origins and implications of handedness and relative birth weight for IQ in monozygotic twin pairs. *Neuropsychologia* 1989;27:549-61.

Shaw JC. An introduction to the coherence function and its use in EEG signal analysis. *Journal of medical engineering & technology* 1981;5:279-88.

Shaw JC, Colter N, Resek G. EEG coherence, lateral preference and schizophrenia. *Psychological medicine* 1983;13:299-306.

Shaw JC, O'Connor KP, Ongley OC. EEG coherence as a measure of cerebral functional organization. In: Brazier MAB, Petsche H, eds. *Architectonics of the Cerebral Cortex*. New York: Raven Press, 1978:245-56.

Shimizu A, Endo M. Comparison of patterns of handedness between twins and singletons in Japan. *Cortex* 1983;19:345-52.

Siebner HR, Limmer C, Peinemann A et al. Long-term consequences of switching handedness: a positron emission tomography study on handwriting in "converted" left-handers. *The Journal of neuroscience* 2002;22:2816-25.

Smith R. *Linkshänder: Geschichte Geschick Begabung*. Düsseldorf: Albatros Verlag, 2002.

Sommer I, Aleman A, Ramsex N et al. Handedness, language lateralisation and anatomical asymmetry in schizophrenia. Meta-analysis. *The British journal of psychiatry* 2001;178:344-51.

Sommerfeld E, Krause W, Schack B et al. Zur Messung von Übungs- und Trainingserfolg auf der Grundlage von EEG-Parametern. Zeitschrift für Pädagogische Psychologie 1999;13:60-73.

Strehlow U, Haffner J et al. Händigkeit und kognitive Fähigkeiten: Befunde an einer repräsentativen Stichprobe Jugendlicher und junger Erwachsener. Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie 1996;24:253-64.

Struve FA, Patrick G, Straumanis JJ et al. Possible EEG sequelae of very long duration marijuana use: pilot findings from topographic quantitative EEG analyses of subjects with 15 to 24 years of cumulative daily exposure to THC. Clinical EEG (electroencephalography) 1998;29:31-6.

Struve FA, Straumanis JJ, Patrick G et al. Topographic quantitative EEG sequelae of chronic marijuana use: a replication using medically and psychiatrically screened normal subjects. Drug and alcohol dependence 1999;56:167-79.

Tan U, Tan M. Testosterone and grasp-reflex differences in human neonates. Laterality 2001;6:181-92.

Thatcher RW, Krause PJ, Hrybyk M. Cortico-cortical association and EEG coherence: A two-compartmental model. Electroencephalography and clinical neurophysiology 1986;64:123-43.

Thatcher RW, McAlaster R, Lester ML et al. Hemispheric EEG asymmetries related to cognitive functioning in children. In: Poreman A, ed. Cognitive Processing in the Right Hemisphere. New York: Academic Press, 1983:125-46.

Trepel M. Neuroanatomie. München, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm: Urban und Fischer, 1999.

Tucker DM, Roth DL, Bair TB. Functional connections among cortical regions: Topography of EEG coherence. Electroencephalography and clinical neurophysiology 1986;63:242-50.

van Beijsterveldt CEM, Molenaar PCM, de Geus EJC, Boomsma DI. Genetic and environmental influences on EEG coherence. *Behavior genetics* 1998;28:443-53.

Volf NV, Razumnikova OM. Sex differences in EEG coherence during a verbal memory task in normal adults. *International journal of psychophysiology* 1999;34:113-122.

Walla P, Hufnagel B, Lindinger G et al. Physiological evidence of gender differences in word recognition: A magnetoencephalographic (MEG) study. *Brain research. Cognitive brain research* 2001;12:49-54.

White MS, Mahler BA, Manschreck TC. Hemispheric specialization in schizophrenics with perceptual aberration. *Schizophrenia research* 1988;32:161-70.

Whittington JE, Richards PN. Mathematical ability and the right-shift-theory of handedness. *Neuropsychologia* 1991;29:1075-82.

Witelson SF. Hand and sex differences in the isthmus and genu of the human corpus callosum. *Brain* 1989;112:799-835.

Wong CW. Corpus callosum and cerebral laterality in a modular brain model. *Medical hypotheses* 2000;55:177-82.

Yeo R, Gangestad SW. Developmental origins of variation in human hand preference. *Genetica* 1993;89:281-96.

Young JZ. Why do we have two brains? In: Mountcastle VB, ed. *Interhemispheric Relations and Cerebral Dominance*. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1962:7-24.

Zappasodi F, Pasqualetti P, Tombini M et al. Hand cortical representation at rest and during activation: gender and age effects in the two hemispheres. *Clinical neurophysiology* 2006;117:1518-28.

9 Danksagung

Zuallererst danke ich Herrn Prof. Dr. Georg Juckel für die Überlassung dieses Themas. Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Dr. Inge Gorynia für die außerordentlich engagierte, kritische, aber auch freundschaftliche Betreuung und Unterstützung. Die Zusammenarbeit im neurophysiologischen Labor fand in einer kreativ anregenden Atmosphäre statt. Hilfreiche Unterstützung erhielt ich auch von PD Dr. Dr. Werner Hopfenmüller vom Biomathematischen Institut der Charité Berlin.

Mein tiefster Dank gilt meinen Eltern, die mich stets unterstützt, zuweilen auf konstruktive Weise in Frage gestellt und letztendlich doch nie an mir gezweifelt haben. Nadine Pahms danke ich von ganzem Herzen für alles, was sie in den letzten Monaten ausgehalten und mit liebevoller Ruhe ertragen hat.

10 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

11 Erklärung

Ich, Juliane B. Flohrer, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema *„Unterschiede in den interhemisphärischen EEG-Kohärenzen zwischen gesunden Männern und Frauen unter Berücksichtigung der Händigkeit“* selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Datum

Unterschrift