

UNIVERSITÄT BIELEFELD

Fakultät für Psychologie und Sportwissenschaften

Abteilung für Psychologie

**Hemisphärenspezifische Aktivierung bei der mentalen Reim- und
Wortgenerierung mittels funktioneller Magnetresonanztomographie
(fMRT) und funktioneller transkranieller Dopplersonographie (fTCD)
im Vergleich**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften
an der Fakultät für Psychologie und Sportwissenschaft
der Universität Bielefeld

Eingereicht von

Sören Krach

Betreuer und Erstgutachter: Prof. Dr. Wolfgang Hartje

Zweitgutachter: PD Dr. Michael Bulla-Hellwig

Bielefeld, März 2006

DANKSAGUNG

Mein größter Dank geht an Herrn Prof. Dr. Hartje für die intensive Betreuung sowie die besondere und liebenswerte Art, die Arbeitseinheit 07 zu leiten. Dadurch war während meiner gesamten Promotionszeit das Arbeitsklima und der persönliche Umgang unter allen MitarbeiterInnen nicht nur sehr konstruktiv, sondern gleichzeitig auch sehr lebendig. Hervorheben möchte ich das Vertrauen, das mir die gesamte Zeit über von Herrn Prof. Dr. Hartje entgegengebracht wurde und seine vorbehaltlose Unterstützung bei allen meinen Plänen und Projekten. Vielen Dank für diese besondere Zeit!

Ein weiterer besonderer Dank geht an die Physiker Jens Sommer und Dr. Andreas Jansen, ohne deren Hilfe ich diese Arbeit nicht auf diese Weise und nicht in einem so kurzen Zeitraum hätte bewerkstelligen können. Ich hoffe, dass wir in Zukunft weiterhin an gemeinsamen Projekten arbeiten können!

Vielen Dank auch an Herrn Dr. A. Lumiani für das initiale Interesse an einer Zusammenarbeit sowie für die Hilfsbereitschaft bei der Organisation und Planung dieses Projektes.

In ganz besonderer Weise möchte ich mich bei Herrn Dr. H. Krüger, Geschäftsführer der Gemeinschaftspraxis für Radiologie und Nuklearmedizin Bielefeld-Zentrum, bedanken. Herr Dr. H. Krüger hat mir in ungewöhnlich großzügiger Weise die kostenlose Nutzung des MRT-Scanners ermöglicht. Ohne sein Entgegenkommen und seine überaus freundliche Unterstützung während der gesamten Datenerhebung wäre die fMRT-Studie nicht zustande gekommen.

Mein Dank gilt auch den medizinisch-technischen Angestellten Martina Lange, Yvonne Struse und Stefanie Schimpke für die Hilfe und die Bereitschaft, an etlichen Wochenenden mit mir die Daten zu erheben.

An dieser Stelle auch einen herzlichen Dank an Herrn Schäfers und Herrn Jeske aus der psychologischen Werkstatt für die perfekte Konstruktion der verschiedenen MR-kompatiblen Geräte.

Vielen Dank an Herrn Prof. Dr. Schiefele für die freundliche Bereitstellung eines Büros während der gesamten Promotionszeit.

Nicht zuletzt einen ganz lieben Gruß und ein spezielles Dankeschön an Meik Bulla-Hellwig, unseren technischen Assistenten Wolfhard Skreczek sowie an Conny Macek und Anke Menzel-Begemann für die schöne und lustige Zeit zusammen.

Abschließend bedanke ich mich bei allen FreundInnen und Verwandten, die mich die gesamte Zeit unterstützt haben und mir in vielen Dingen Mut zugesprochen haben.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
2. THEORIE	3
2.1. Magnetresonanztomographie (MRT)	3
2.1.1. Physikalische Grundlagen der MRT	3
2.1.1.1. Das Gehirn im magnetischen Feld	3
2.1.1.2. Schaltung eines Radiofrequenzimpulses	4
2.1.1.3. Messung der Relaxation	5
2.2. Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)	7
2.2.1. Physikalische Grundlagen der fMRT	7
2.2.2. Vor- und Nachteile funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT)	8
2.2.3. Gütekriterien von fMRT-Messungen	9
2.2.3.1. Reliabilität	9
2.2.3.2. Validität	9
2.2.4. Statistische Aussagekraft bei fMRT-Messungen	10
2.2.4.1. Hardware-Einstellungen	10
2.2.4.2. fMRT-Untersuchungsdesigns	10
2.2.5. Auswertung der funktionellen MRT-Daten	12
2.2.5.1. Räumliche Anpassung	13
2.2.5.2. Statistische Analyse der fMRT-Daten	15
2.2.5.3. Auswertung der funktionellen Daten über fMRT-Lateralitätsindex (fMRT-LI)	19
2.3. Funktionelle transkranielle Dopplersonographie (fTCD)	23
2.3.1. Physikalische Grundlagen der fTCD	23
2.3.2. Hirnanatomische Grundlagen der fTCD	26
2.3.3. Vor- und Nachteile funktioneller transkranieller Dopplersonographie (fTCD)	28
2.3.3.1. Gütekriterien von fTCD-Messungen	29
2.3.4. Auswertung der funktionellen TCD-Daten	32
2.4. Vergleichende Bewertung von fMRT und fTCD	32
2.5. Alternative Verfahren zur Bestimmung der Sprachlateralisation	33
2.5.1. Wada-Test	33
2.5.2. Transkranielle Magnetstimulation (TMS)	34
2.5.3. Positronen-Emissions-Tomographie (PET)	35
2.6. Funktionelle Hemisphärenasymmetrie bei Sprachprozessen	35
2.6.1. Sprachbezogene Verarbeitung	35

2.6.1.1.	Konzept der sprachlichen Hemisphärendominanz (SHD)	35
2.6.1.2.	Komponenten des Sprachsystems	36
2.6.1.3.	Lokalisation der expressiven Sprachareale	36
2.6.1.4.	Methoden zur Lokalisation der Sprachareale	38
2.6.1.5.	Aktivierungen sprachrelevanter Areale in bisherigen Studien	42
2.6.2.	Händigkeit	60
2.6.3.	Geschlecht	62
2.6.4.	Herleitung der Fragestellungen	63
2.7.	Hypothesen der Studie	66
3.	METHODE	71
3.1.	Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT)	71
3.1.1.	Stichprobe	71
3.1.1.1.	Rekrutierung der Versuchspersonen für die fMRT-Studie	71
3.1.1.2.	Ausschlusskriterien	71
3.1.1.3.	Zusammensetzung der Stichprobe	73
3.1.2.	Versuchsdurchführung und Versuchsablauf	74
3.1.2.1.	Ort der fMRT-Datenerhebung	74
3.1.2.2.	Apparaturen der fMRT-Studie	74
3.1.2.3.	Herstellung der Apparaturen	75
3.1.2.4.	Versuchsvorbereitung	77
3.1.2.5.	Anatomische Messung	78
3.1.2.6.	Funktionelle Messung	79
3.1.2.7.	Versuchsablauf während funktioneller Aufnahmen	79
3.1.2.8.	Präsentation der Stimuli	80
3.1.3.	Stimulusmaterial und Aufgabenstellung	80
3.1.3.1.	Aufgabenstellung und Art der Reizdarbietung	80
3.1.3.2.	Instruktionen der verschiedenen Aufgaben	81
3.1.3.3.	Entwicklung des faktoriellen Designs	86
3.1.4.	Auswertung der funktionellen MRT-Daten	92
3.1.4.1.	Transformation der Daten in ein SPM2-kompatibles Format	92
3.1.4.2.	Orientierung der Bilder	92
3.1.4.3.	Räumliche Anpassung	93
3.1.4.4.	Statistische Analyse der funktionellen Daten	94
3.1.4.5.	Random Effects Analyse (RFX-Analyse)	95
3.1.4.6.	Auswertung der funktionellen MR-Daten zur Ermittlung eines Lateralitätsindex	96
3.2.	Methode der funktionellen transkraniellen Dopplersonographie (fTCD)	98
3.2.1.	Stichprobe	98
3.2.1.1.	Rekrutierung der Versuchspersonen für die fTCD-Studie	98

3.2.1.2.	Ausschlusskriterien	99
3.2.1.3.	Zusammensetzung der Stichprobe	99
3.2.2.	Versuchsdurchführung und Versuchsablauf	100
3.2.2.1.	Ort der fTCD-Versuchsdurchführung	100
3.2.2.2.	Apparaturen der fTCD-Studie	100
3.2.2.3.	Vorbereitung der Versuchsdurchführung	101
3.2.3.	Stimulusmaterial und Aufgabenstellung	101
3.2.3.1.	Aufgabenstellung und Art der Reizdarbietung	101
3.2.3.2.	Instruktion	102
3.2.4.	Auswertung der funktionellen TCD-Daten	105
3.2.4.1.	Transformation der Rohdaten in ASCII-Format	105
3.2.4.2.	Verwendete Filtereinstellungen	106
3.2.4.3.	Period-of-Interest Analysen (POI)	107
3.2.4.4.	Auswertung der funktionellen TCD-Daten zur Ermittlung eines Lateralitätsindex	108
4.	ERGEBNISSE	110
4.1.	Ergebnisse der funktionellen MRT in der Gesamtgruppe	110
4.1.1.	Leistungsaspekte (fMRT)	110
4.1.1.1.	Analyse der Leistung geordnet nach Versuchspersonen	110
4.1.1.2.	Analyse der Leistung geordnet nach Buchstaben und Reimwörtern	112
4.1.2.	Physiologische Messwerte (fMRT)	114
4.1.2.1.	fMRT-Aktivierungen auf Versuchspersonenebene	114
4.1.2.2.	ROI-Analysen und Lateralitätsbestimmung auf Versuchspersonenebene	121
4.1.2.3.	fMRT-Aktivierungen auf Gruppenebene	136
4.1.2.4.	ROI-Analysen und Lateralitätsbestimmung auf Gruppenebene	147
4.2.	Ergebnisse der funktionellen TCD in der Gesamtgruppe	148
4.2.1.	Leistungsaspekte (fTCD)	148
4.2.2.	Physiologische Messwerte (fTCD)	150
4.2.2.1.	Blutfluss linke und rechte Hemisphäre	150
4.2.2.2.	fTCD-Aktivierungsindex (fTCD-AI)	151
4.2.2.3.	fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI)	152
4.3.	fMRT- und fTCD-Daten in der Substichprobe	152
4.3.1.	fMRT-Daten in der Substichprobe	153
4.3.1.1.	Leistungsaspekte (fMRT)	153
4.3.1.2.	Physiologische Messwerte (fMRT)	153
4.3.2.	fTCD-Daten in der Substichprobe	154
4.3.2.1.	Leistungsaspekte (fTCD)	154
4.3.2.2.	Physiologische Messwerte (fTCD)	154
4.3.3.	Vergleich der Daten zwischen der fMRT- und der fTCD-Studie in der Substichprobe	155

4.3.3.1.	Vergleich der Leistungsparameter	155
4.3.3.2.	Vergleich der physiologischen Daten	155
5.	DISKUSSION	159
5.1.	Diskussion der Hypothesen zur funktionellen Magnetresonanztomographie	159
	Hypothesen 1 und 2	159
	Hypothesen 3 und 4	162
	Hypothese 5	167
	Hypothese 6	167
	Hypothese 7	169
	Hypothese 8	170
	Ergänzende fMRT-Ergebnisdiskussion	170
	Hypothese 9	172
	Diskussion der fMRT-Methode	173
	Diskussion auffälliger Ventrikelaktivierungen bei der fMRT-Studie	176
	Diskussion der Stimuluskonstruktion für die fMRT-Studie	176
5.2.	Diskussion der Hypothesen zur funktionellen transkraniellen Dopplersonographie	178
	Hypothese 1	178
	Hypothese 2	179
5.3.	Diskussion der Hypothesen zum Vergleich der fTCD- und fMRT-Daten	179
	Hypothese 1	179
	Hypothese 2	180
6.	FAZIT UND AUSBLICK	181
7.	ZUSAMMENFASSUNG	183
8.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	185
9.	TABELLENVERZEICHNIS	187
10.	LITERATUR	188
11.	ANHANG	1

1. EINLEITUNG

Um in der klinischen Praxis einen Eingriff ins Hirngewebe, z. B. bei der Entfernung von Tumoren oder epileptischen Herden, vornehmen zu können, müssen vor einer Operation die sprachrelevanten Areale lokalisiert werden. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass die Patienten als Folge der Operation Sprachstörungen in Form einer Aphasie entwickeln. Die heutzutage gängigste Methode bei der prächirurgischen Diagnostik der sprachdominanten Hemisphäre ist der Wada-Test. Wegen der beträchtlichen Nachteile des Wada-Tests wurde bereits vielfach versucht, mit alternativen nichtinvasiven Techniken und Untersuchungsparadigmen eine ähnlich zuverlässige und valide Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zu erreichen (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998; Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998). Hauptansatzpunkt zur Entwicklung eines solchen alternativen Vorgehens ist hierbei die Beobachtung von physiologischen Veränderungen auf Hirnebene mittels nichtinvasiver bildgebender Techniken (z. B. funktioneller Kernspintomographie oder funktioneller transkranieller Dopplersonographie), während die Probanden/Patienten unterschiedlichste Sprachaufgaben bearbeiten. Die bis heute bezüglich der Bestimmung der sprachdominanten Hemisphäre sicherste Alternative zum Wada-Test ist die Durchführung einer Wortgenerierungsaufgabe in Kombination mit bildgebenden Verfahren (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998).

In der Studie von Krach und Hartje wurde versucht, mit einem im Vergleich zu den klassischen Ansätzen (Wortgenerierung, semantische Generierung etc.) alternativen Verfahren die nichtinvasive Bestimmung der sprachdominanten Hemisphäre zu verbessern (Krach & Hartje, 2006). Hierzu wurde eine selbstentwickelte Reimgenerierungsaufgabe als Alternative zum klassischen Wortgenerierungsparadigma getestet und die Sprachlateralisation mittels funktioneller transkranieller Dopplersonographie bestimmt. Es zeigte sich, dass mit der Reimgenerierungsaufgabe eine im Vergleich zur Wortgenerierungsaufgabe noch deutlichere Lateralisation zur angenommenen sprachdominanten linken Hemisphäre erreicht wurde (Krach & Hartje, 2006). Die Vermutung war, dass dabei insbesondere der Prozess des Generierens in Kombination mit einer phonologischen Aufgabe zu einer stärkeren Aktivierung der sprachlichen Areale führen würde (Calvert et al., 2000; Krach & Hartje, 2006).

Aufbauend auf diesen viel versprechenden Ergebnissen war das Ziel der vorliegenden Studie, die Reim- und Wortgenerierungsaufgabe mittels zweier verschiedener Bildgebungsverfahren (fTCD und fMRT) vergleichend zu untersuchen und im Hinblick auf ihre Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre nichtinvasiv dennoch aber zuverlässig zu lokalisieren, zu bewerten. Gleichzeitig sollte mit Hilfe der funktionellen Kernspintomographie gezeigt werden, welche Hirnregionen speziell an der Verarbeitung phonologischer Inhalte (vs. lexikalischer Inhalte) beteiligt sind und ob es eventuell Strukturen gibt, die für die Generierung (vs. Entscheidung) von Wörtern oder Reimen zuständig sind. Dazu sollte eine möglichst hohe Anzahl an Probanden zu zwei Messzeitpunkten sowohl mit fMRT und als auch mit fTCD untersucht werden. Anhand einer solchen Stichprobe könnten Vergleiche zwischen den verschiedenen Bildgebungsverfahren und Aufgabenparadigmen bezüglich ihrer Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre zuverlässig und robust zu lokalisieren, vorgenommen werden.

2. THEORIE

2.1. Magnetresonanztomographie (MRT)

2.1.1. Physikalische Grundlagen der MRT

Bei der Magnetresonanztomographie wird, während die Person in einem magnetischen Feld liegt, die Antwort von Wasserstoffatomen auf eine von außen eingesetzte Störung des magnetischen Feldes gemessen. Drei Schritte können bei der Magnetresonanztomographie unterschieden werden: Erstens wird ein Körperteil, in diesem Fall der Kopf, in ein magnetisches Feld gelegt, zweitens wird ein kurzer Radiofrequenzimpuls (RF) geschaltet und drittens die anschließende Relaxation gemessen (Horowitz, 1995).

2.1.1.1. Das Gehirn im magnetischen Feld

Zur Messung von MR-Signalen muss das Gehirn als erstes in ein magnetisches Feld gebracht werden. Die Magnetfeldstärke eines MR-Tomographen wird in Tesla¹ angegeben. Generell können die magnetischen Eigenschaften von Atomkernen mit ungerader Protonenzahl gemessen werden. Bei der MR-Bildgebung werden hauptsächlich Wasserstoffprotonen gemessen, da sie das am häufigsten vorkommende Element im Gehirn sind und zusätzlich ein starkes Signal liefern. In jedem Wasserstoffatom befindet sich nur ein positiv geladenes Proton (weswegen die Begriffe „Proton“ und „Wasserstoffkern“ auch gegeneinander austauschbar sind), welches sich ständig um die eigene Achse dreht. Die Bewegung der elektrischen Ladung wird als Spin (Kernspin) bezeichnet und ist nichts anderes als elektrischer Strom. Dort wo elektrischer Strom fließt, gibt es auch ein Magnetfeld. Jedes einzelne Proton besitzt somit sein eigenes Magnetfeld. Das magnetische Feld eines jeden Protons kann durch einen Vektor beschrieben werden, der die Stärke (Amplitude) und die Ausrichtung des

¹ Tesla (Maßeinheit), der magnetischen Induktion (magnetische Flussdichte) mit der Einheit T. Benannt nach Nikola Tesla (1856-1943), amerikanisch/kroatischer Elektrotechniker und Erfinder. Dabei entspricht 1 Tesla (T) = 10000 Gauss (G) (Erdmagnetfeld = 0.5 G)

Feldes beschreibt. Bevor ein Proband im Magnetresonanztomographen liegt, zeigen die Vektoren in zufällige Richtung, sprich sind unkoordiniert. Liegt der Kopf schließlich im Magnetresonanztomographen, ordnen sich die Vektoren teils in Richtung (parallel), teils in Gegenrichtung (antiparallel) zum äußeren magnetischen Feld an, wobei die antiparallele Ausrichtung ein höheres Energieniveau erfordert. Die magnetischen Kräfte der in entgegengesetzte Richtungen weisenden Protonen heben sich gegenseitig auf bzw. neutralisieren sich. Da jedoch mehr Vektoren parallel (also in Feldrichtung, die konventionell auf der z-Achse eines Koordinatensystems abgetragen wird) ausgerichtet sind, können einige Protonen nicht neutralisiert werden: Diese Protonen sind bei der Magnetresonanztomographie von Interesse. Die Vektoren sind aber nicht nur auf bestimmte Art und Weise zum externen magnetischen Feld ausgerichtet, sondern bewegen sich zusätzlich. Diese Bewegung wird Präzession genannt und ähnelt der rotierenden Bewegung eines Kreisels. Je stärker das externe Magnetfeld, desto größer ist auch die Präzessionsgeschwindigkeit bzw. -frequenz und desto mehr Vektoren richten sich parallel zum externen Magneten aus (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). Weil die Präzessionsgeschwindigkeit für jede Art von Proton (Wasserstoff, Natrium etc.) unterschiedlich ist (weswegen auch verschiedene Hirnsubstanzen voneinander unterschieden werden können), ist es wichtig, die genaue Präzessionsfrequenz zu errechnen. Dies geschieht mit Hilfe der Lamor-Gleichung:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

ω_0 ist die Präzessionsfrequenz (in Hertz oder Megahertz)

B_0 ist die Stärke des externen Magnetfeldes gemessen in Tesla (T)

γ ist das gyromagnetische Verhältnis, welches für verschiedene Substanzen unterschiedlich groß ist

2.1.1.2. Schaltung eines Radiofrequenzimpulses

Im zweiten Schritt bei der Messung von MR-Signalen wird von außen ein Radiofrequenzimpuls (d. h. eine elektromagnetische Welle) geschaltet, was dazu führt, dass die bis zu diesem Zeitpunkt longitudinal ausgerichteten Vektoren um 90° in die x-y-Ebene gekippt und ihre Präzessionen synchronisiert werden (transversale Magnetisierung; siehe Abbildung 1). Die Protonen sind nun „in Phase“. Die ursprüngliche

Longitudinalmagnetisierung (Anordnung in Richtung Magnetfeld) hat sich nun in eine Transversalmagnetisierung (quer zum externen Magnetfeld) geändert, bei der sich einige Vektoren auf einem höheren Energieniveau befinden. Dies funktioniert nur, wenn der Radiofrequenzimpuls identisch mit der Präzessionsfrequenz der Vektoren ist (weswegen es auch wichtig ist, die Präzessionsfrequenz mittels Lamor-Gleichung zu errechnen; s. o.). Dieses Phänomen wird als Resonanz bezeichnet. Auf diese Weise gelingt es, selektiv die Vektoren der Wasserstoffprotonen zu kippen (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). Nach Abschaltung des RF-Impulses kehren die Vektoren langsam wieder in ihre ursprüngliche Ausrichtung (Longitudinalmagnetisierung, niedrigeres Energieniveau) zurück und dephasieren (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). Dieser Prozess, die Rückkehr auf ein niedrigeres Energieniveau, wird als Relaxation (Spinerholung) bezeichnet.

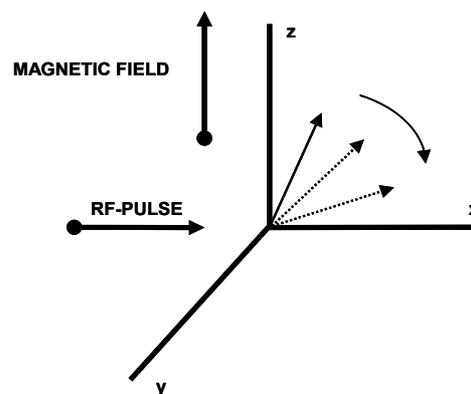


Abbildung 1: Radiofrequenzimpuls (aus: de Haan & Rorden, 2004)

2.1.1.3. Messung der Relaxation

Der RF-Impuls hat also Energie an das System geliefert, die aber wieder freigesetzt wird, sobald sich das System in den Originalzustand zurückbewegt. Dieses Freisetzen von Energie liefert schließlich das Signal, das bei der Magnetresonanztomographie gemessen wird. Bei der Relaxation, also der Rückkehr in den Gleichgewichtszustand, werden drei voneinander unabhängige Komponenten unterschieden: Erstens, der Wiederanstieg der Magnetisierung in Richtung der z-Achse, der als T_1 -Relaxationszeit (Longitudinalrelaxation) bezeichnet wird, zweitens, das Abklingen der Magnetisierung in Richtung der x-y-Achse (die Protonen dephasieren), als T_2 -Relaxationszeit (Transversalrelaxation) bezeichnet, und drittens, das beschleunigte Dephasieren der

Vektoren infolge von lokalen Magnetfeldinhomogenitäten (um die die T_2 -Relaxationszeit korrigiert wird) und Spin-Spin-Interaktionen, was als T_2^* -Relaxationszeit beschrieben wird (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). Allgemein gilt, dass das gemessene MR-Signal umso größer ist, je kleiner die Magnetfeldinhomogenitäten sind (Heeger & Ress, 2002; Horowitz, 1995; Matthews, 2001). Die T_1 -Relaxationszeit wird auch als Spin-Gitter-Relaxation bezeichnet, da hier die Energie an die Umgebung (Gitter) abgegeben wird. Die T_2 -Relaxationszeit wird dagegen auch als Spin-Spin-Relaxation bezeichnet, da es hier zu einem Austausch von Energie zwischen den Spins kommt. Die Länge von T_1 und T_2 ist abhängig vom untersuchten Gewebe (z. B. hat Wasser eine lange T_1 und eine lange T_2 , Fett dagegen eine kurze T_1 und eine kurze T_2). Das MR-Signal ist unmittelbar nach Abschalten des Hochfrequenzimpulses am stärksten und nimmt dann kontinuierlich ab. Dieses Abklingen an Signalintensität, bei gleich bleibender Frequenz, wird als FID-Signal („free induction decay“) bezeichnet. Je nachdem zu welchem Zeitpunkt nach Schaltung eines RF-Impulses man MR-Signalunterschiede zwischen verschiedenen Gewebearten misst (TE = time to echo), erhält man entweder T_1 -gewichtete, T_2 -gewichtete oder T_2^* -gewichtete Images (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). Die Zeit zwischen zwei RF-Impulsen wird als TR (repetition time) bezeichnet. T_1 -gewichtete Bilder (kurze TE und TR) bilden besonders gut die Kontraste zwischen weißer und grauer Substanz ab und werden daher für anatomische Aufnahmen verwendet. T_2 -gewichtete Bilder (lange TE und TR) eignen sich dagegen besonders gut, um Läsionen anzuzeigen und werden daher auch als pathologische Aufnahmen bezeichnet (Horowitz, 1995; Jezzard & Clare, 2001). T_2^* -gewichtete Bilder werden bei der funktionellen Bildgebung verwendet (s. u.). Typischerweise wird diese Prozedur (Schalten einer oder mehrerer RF-Impulse und anschließende Messung der Energiefreisetzung) während eines MR-Experiments mehrfach wiederholt (für eine ausführlichere Beschreibung sei an dieser Stelle auf „MRI made easy“ von Schering oder „Magnete, Spins und Resonanzen – Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie“ (2003) von Siemens verwiesen).

2.2. Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

2.2.1. Physikalische Grundlagen der fMRT

Bei der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) werden die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von Oxyhämoglobin (HbO_2) und Desoxyhämoglobin (Hb) in den Erythrozyten genutzt, um so kognitive Veränderungen im Gehirn darzustellen (Rullkötter, 2004). Durch Aktivierung einer kortikalen Region kommt es in der Folge zu einem erhöhten lokalen Blutfluss ($r\text{CBFV}^2$) sowie zu einem erhöhten lokalen Blutvolumen ($r\text{CBV}$) in dieser Region. Dieser Prozess wird auch neurovaskuläre Kopplung genannt (Bullmore & Suckling, 2001; Heeger & Ress, 2002; Horwitz, Friston, & Taylor, 2000; Matthews, 2001; Ugurbil, Toth, & Kim, 2003). Für kurze Zeit führt dies zu einer Überkompensation durch sauerstoffreiches Blut und demzufolge zu einer lokalen Abnahme von sauerstoffarmem Blut. Da Oxyhämoglobin im Gegensatz zu Desoxyhämoglobin keine magnetischen Eigenschaften besitzt, beeinträchtigt es auch nicht die umliegenden magnetischen Felder (s. o.) und führt damit in Bereichen mit einem größeren Anteil an sauerstoffreichem Blut (d. h. aktivierte Regionen) zu einer lokalen Signalerhöhung in den MR-Bildern (Heeger & Ress, 2002). Bereiche mit einem, relativ gesehen, höheren Anteil an Desoxyhämoglobin dagegen führen zu größeren Feldinhomogenitäten und daher auch zu einem Abfall der fMRT-Signalintensität (Heeger & Ress, 2002; Matthews, 2001). Dies ist der so genannte BOLD- (blood oxygenation level-dependent contrast) Effekt, bei dem das Hämoglobin als eine Art „natürliches Kontrastmittel“ genutzt wird (Kwong et al., 1992). Das BOLD fMRT-Signal, als Antwort auf eine vorübergehende neuronale Aktivierung, kann über die hämodynamische Antwortfunktion (HRF = hemodynamic response function) beschrieben werden. Es untergliedert sich in drei Bereiche: Einen anfänglichen Abfall an Signal-Intensität (sog. „initial dip“), der dadurch zustande kommt, dass die aktiven Neurone Sauerstoff verbrauchen und dadurch der relative Anteil an Desoxyhämoglobin im Blut erhöht ist, einem darauf folgenden starken Anstieg des BOLD fMRT-Signals („overshoot“), welches durch die Überkompensation mit sauerstoffhaltigem Blut (mit einem Maximum nach ca. 6 Sekunden) erklärt werden kann, und schließlich mit einem

² $r\text{CBFV}$ = regional cerebral blood flow velocity

langsamen Abklingen des BOLD fMRT-Signals bis zum Ausgangswert nach ca. 24 Sekunden (siehe Abbildung 2) (Heeger & Ress, 2002).

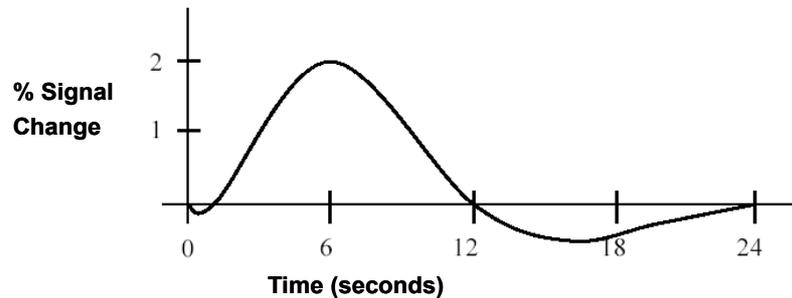


Abbildung 2: Hämodynamische Antwortfunktion (HRF) (aus: de Haan & Rorden, 2004)

2.2.2. Vor- und Nachteile funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT)

Allgemein ist es wichtig, sich zu verdeutlichen, dass es sich bei dem BOLD-Signal nur um eine indirekte Messung der zugrunde liegenden neuronalen Aktivität handelt und dass sich das BOLD fMRT-Signal aus der Summe der aktivierten Neurone zusammensetzt. Das bedeutet, dass ein fMRT-Signal einerseits durch eine starke Aktivierung weniger Neurone oder andererseits durch eine relativ schwache Aktivierung mehrerer Neurone verursacht werden kann (Heeger & Ress, 2002; Scannell & Young, 1999). Ein weiteres Problem ist, dass die hämodynamische Antwort langsamer als die zugrunde liegende neuronale Aktivität ist und die fMRT somit eine relativ schwache zeitliche Auflösung besitzt, insbesondere im Vergleich zu anderen Methoden wie z. B. der fTCD oder dem EEG. In Abhängigkeit vom Volumen der sauerstoffversorgenden Arterien der untersuchten Region unterliegt das BOLD fMRT-Signal zudem gewissen Schwankungen (Lai, Glover, & Haacke, 2000; Menon & Goodyear, 2001; Ugurbil et al., 2003). Größere Arterien liefern dabei ein besseres Signal, liegen dafür aber häufig einige Millimeter vom Ort der neuronalen Aktivierung entfernt. Die ansonsten gute räumliche Auflösung, die im Millimeterbereich liegt, ist dadurch beeinträchtigt.

2.2.3. Gütekriterien von fMRT-Messungen

2.2.3.1. Reliabilität

Mehrere Studien prüften die Zuverlässigkeit der funktionellen Kernspintomographie bei der Lateralisation sprachrelevanter Areale. Fernández und Mitarbeiter untersuchten dazu 12 Patienten mit Temporallappenepilepsie (TLE-Patienten) zu zwei Zeitpunkten anhand einer Synonym-Entscheidungsaufgabe und fanden dabei auf Voxel Ebene³ höhere Reliabilitäten in frontalen im Vergleich zu posterioren Regionen (global: $r = .82$, $p < .001$; Broca: $r = .84$, $p < .001$; Rest präfrontal: $r = .98$, $p < .0001$; parieto-temporal: $r = .70$, $p < .05$). Zudem konnte gezeigt werden, dass unabhängig von der Sprachlateralität (links – bilateral – rechts), die Reliabilität der Messung gleichermaßen hoch ausfiel (Fernández et al., 2003).

2.2.3.2. Validität

Zur Prüfung der Validität funktioneller Kernspintomographischer Untersuchungen der Sprachlateralisation wurden vielfach Vergleichsstudien mit PET, dem Wada-Test (siehe Abschnitt 2.5.1) oder mit fTCD durchgeführt. In Studien, die einen Vergleich von Wada-Test Ergebnissen mit der funktionellen Kernspintomographie vornahmen, konnten aufgrund der Invasivität des Wada-Tests ausschließlich Epilepsiepatienten untersucht werden. Hierbei zeigte sich unter Verwendung verschiedener Paradigmen eine hohe Übereinstimmung zwischen beiden Untersuchungsmethoden (Adcock, Wise, Oxbury, Oxbury, & Matthews, 2003; Benson et al., 1999; Binder et al., 1996; Deblaere et al., 2002; Desmond et al., 1995; Gaillard et al., 2004; Lehericy et al., 2000; Rutten, Ramsey, van Rijen, Alpherts, & van Veelen, 2002; Sabbah et al., 2003; Sabsevitz et al., 2003; Spreer et al., 2001; Wörmann et al., 2003; Yetkin et al., 1998). Auch Vergleiche mit PET oder fTCD bezüglich der Sprachlateralisation bei Gesunden dienten zur Validierung der fMRT-Methode (Deppe, Ringelstein, & Knecht, 2004; Mechelli, Friston, & Price, 2000; Schlösser et al., 1998; Xiong, Rao, Gao, Woldorff, & Fox, 1998).

³ Voxel = Abkürzung für „volume element“; ein Voxel ist der kleinste definierbare Punkt innerhalb eines Volumens

2.2.4. Statistische Aussagekraft bei fMRT-Messungen

Da die gemessene BOLD-Antwort im Allgemeinen sehr klein ist (2-5% Signalveränderung), gilt es als relativ schwierig, wirkliche Effekte nachzuweisen. Um die statistische Aussagekraft zu erhöhen, ist es daher wichtig, die Hardware-Einstellungen zu optimieren und gleichzeitig ein möglichst gutes Untersuchungsdesign zu entwickeln.

2.2.4.1. Hardware-Einstellungen

Was die Hardware-Einstellungen betrifft, ist es entscheidend, welche Art von Scanning-Technik eingesetzt wird. Das meist eingesetzte Verfahren in der funktionellen Magnetresonanztomographie ist das Echo-Planar-Imaging (EPI), welches es erlaubt, sehr schnelle Sequenzen bzw. Messungen des MR-Signals vorzunehmen und eine starke T_2^* -Empfindlichkeit aufweist (Mansfield & Maudsley, 1977). Hierbei gilt, dass das T_2^* -Signal von Blut umso stärker ist, je besser die Passung zwischen TE (time to echo; s. o.) und T_2^* ist. Je kürzer jedoch die TE ist, desto mehr Aufnahmen können in einem definierten Zeitintervall vorgenommen werden, was wiederum, bedingt durch die größere Anzahl an Daten, auch die statistische Aussagekraft erhöht. Im Endeffekt muss ein geeigneter Mittelweg gefunden werden. Ferner wird das gemessene Signal durch die Wahl der Matrix-, Voxel und Field-of-View-Größe beeinflusst. Je höher die gewählte Voxelgröße desto schlechter ist zwar die räumliche Auflösung, es müssen jedoch auch weniger Schichten gemessen werden, um das komplette Gehirn abzubilden (z. B. nur 22 anstatt 36 Schichten). Dies hat den Vorteil, dass man mehr Daten pro Hirnregion in der gleichen Messzeit erhält. Um zeitlich und räumlich noch effektiver vorzugehen, können auch Messungen in einer zuvor spezifizierten interessierenden Region (ROI; Region-of-Interest) vorgenommen werden. Dabei können noch weniger Schichten mit noch kleinerer Voxelgröße gemessen werden, allerdings erhält man so keine Ganzhirnaufnahmen mehr.

2.2.4.2. fMRT-Untersuchungsdesigns

Ein optimales Untersuchungsdesign maximiert die Wahrscheinlichkeit, eine zuverlässige Antwort auf die untersuchte Fragestellung zu erhalten (de Haan & Rorden,

2004). In der aktuellen Forschung werden das Blockdesign (Boxcar-Design), das faktorielle Design sowie das Event-related Design am häufigsten verwendet:

2.2.4.2.1. Das Blockdesign

Beim Blockdesign werden zwei oder mehr Bedingungen intermittierend mit einer Ruhebedingung in einem festen zeitlichen Abstand abwechselnd wiederholt dargeboten. Eine Bedingung kann dabei auch aus mehreren hintereinander dargebotenen Stimuli, z. B. flackernde Lichtpunkte, bestehen. Die optimale Länge eines Blocks liegt bei 14-20 Sekunden (Zarahn, Aguirre, & D'Esposito, 1997). Über die anschließende Mittelung des fMRT-Signals über alle Blöcke hinweg, wird eine beachtliche statistische Power erreicht (Aguirre & D' Esposito, 2000). Dabei wird versucht, die Bedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten, so dass sie sich bestenfalls nur noch im interessierenden Merkmal unterscheiden. Das fMRT-Signal, welches dann zwischen den verschiedenen Bedingungen differenziert (also bei einer Aufgabe eine Aktivierung hervorruft und bei der anderen nicht), repräsentiert danach den interessierenden kognitiven Prozess. Dieses so genannte „kognitive Subtraktionsparadigma“ beruht auf der allerdings fragwürdigen Annahme, dass jede Bedingung alle Funktionen der vorhergehenden Ebene umfasst und es zu keinerlei Interaktion zwischen den einzelnen Komponenten kommt (Aguirre & D' Esposito, 2000; Donaldson & Buckner, 2001; Friston et al., 1996). Danach ruft jede kognitive Komponente eine spezielle physiologische Aktivierung hervor, die vom kognitiven oder physiologischen Kontext völlig unabhängig ist (Friston et al., 1996). Ein weiteres Problem von Blockdesigns besteht darin, dass eine randomisierte Darbietung der Stimuli innerhalb eines Blockes nicht möglich und damit die Abfolge für die Versuchspersonen leicht vorhersagbar ist (Aguirre & D' Esposito, 2000).

2.2.4.2.2. Das faktorielle Design

Um zu testen, ob verschiedene Komponenten miteinander interagieren und nicht bloß additiv bzw. linear verknüpft sind [insbesondere bei einem so non-linearen System wie dem Gehirn (Aertsen & Preissl, 1991)], bieten sich faktorielle Designs an. Nach Friston und Mitarbeitern zeigt sich der Effekt einer kognitiven Komponente (unabhängig von allen anderen Komponenten) am besten in seinem Haupteffekt. Das Zusammenspiel mehrerer Komponenten (der kognitive Prozess im Kontext anderer, zeitgleich ablauf-

ender Prozesse) wird dagegen am besten durch den Interaktionseffekt beschrieben (Friston et al., 1996). Eingesetzt werden kann das faktorielle Design z. B., um den Effekt eines Pharmakons (Verum vs. Placebo) auf eine Aktivierung (Aufgabe vs. Kontrolle) zu untersuchen (Büchel, Price, Frackowiak, & Friston, 1998; Weiller, Chollet, Friston, Wise, & Frackowiak, 1992; Weiller et al., 1995).

2.2.4.2.3. Das Event-related Design

Bei Event-related Designs wird die hämodynamische Antwortfunktion für jeden Stimulus einzeln geschätzt und kann anschließend über gleiche Stimulustypen gemittelt werden (Aguirre & D'Esposito, 2000; Dale, 1999; Dale & Buckner, 1997; Donaldson & Buckner, 2001). Da Veränderungen im BOLD fMRT-Signal bei der Einzelpräsentation von Stimuli meist nur sehr schwach auftreten, ist die statistische Power bei Event-related Design eher gering (Aguirre & D'Esposito, 2000). Vorteile dieses Designs liegen darin, dass die Stimuli randomisiert dargeboten werden können und dadurch Konfundierungen durch Habituation, Antizipation und Strategieeffekte vermieden werden können (Aguirre & D'Esposito, 2000; Donaldson & Buckner, 2001). Zusätzlich können im Nachhinein bestimmte Durchgänge bzw. Stimuli bei der Analyse herausgenommen werden, beispielsweise alle nicht erinnerten Items einer Gedächtnisaufgabe (Donaldson & Buckner, 2001). Insgesamt bieten Event-related Designs größere Freiheitsgrade bei der Durchführung von Experimenten als geblockte Designs und ermöglichen dadurch, dass noch exaktere Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen werden können. Die statistische Aussagekraft (Power) ist dagegen geringer als bei geblockten Designs.

2.2.5. Auswertung der funktionellen MRT-Daten

Mit dem Ziel einer Kartierung des Gehirns, in der die relevanten funktionellen Aktivierungen abgetragen werden können, müssen nach Erhalt der EPI-Daten eine Reihe von Verarbeitungsschritten mit der statistischen Auswertungssoftware SPM2 (Statistical Parametric Mapping Software, SPM; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK; online verfügbar unter URL: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>; Stand: 5.12.2005) vorgenommen werden (siehe Abschnitt 3.1.4.). Diese Verarbeitungsschritte können grob in drei Bereiche untergliedert werden: Zeitliche Anpassung (*slice*

*timing correction*⁴), räumliche Anpassung (*spatial realignment*, *spatial normalization*, *spatial smoothing*) und voxelbasierte, statistische Analyse der Daten.

Die zeitliche Anpassung findet hauptsächlich in Event-related Designs Anwendung und kann bei geblockten Designs vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 3.1.4.).

2.2.5.1. Räumliche Anpassung

2.2.5.1.1. Räumliche Ausrichtung (*spatial realignment*)

Während eines fMRT-Experiments werden hunderte von 3D EPI-Bildersequenzen pro Versuchsperson aufgezeichnet. Obwohl die Probanden gebeten werden, sich während der Messung so wenig wie möglich zu bewegen, sind kleinste Kopfbewegungen unvermeidbar. Auch physiologische Bewegungen wie Herzschlag und Atmung führen innerhalb der Schädelkalotte zu Bewegungen von mehreren Millimetern (Büchel & Weiller, 2002). Das Resultat ist, dass ein Voxel nicht durchgängig den gleichen Ort im Gehirn repräsentiert, sondern es mit der Zeit zu einer räumlichen Verschiebung kommt (Brammer, 2001; Smith, 2001). Problematisch wird solch eine Verschiebung, wenn ein Voxel von einem wenig aktivierten Bereich über räumliche Verschiebung in einen Bereich höherer Aktivierung „wandert“ und somit die Aktivierungszunahme in diesem Voxel auf einen Bewegungsartefakt zurückzuführen ist. Bewegungsartefakte können auf zwei verschiedene Weisen wirken: Eine mit der Leistung korrelierte Bewegung (rhythmische Kopfbewegungen immer beim Drücken der Antwort-Tasten) führt zu einer artifiziell erhöhten Aktivierung bei der statistischen Analyse, eine solche mit Leistung unkorrelierte Bewegung verschlechtert das Signal-Rausch Verhältnis und damit die Power der Messung (Ashburner & Friston, 1997, 2000; Brammer, 2001). Um Bewegungsartefakte zu vermeiden, wird zu Beginn der Vorverarbeitung der Daten für jede Versuchsperson das *Spatial Realignment* (Räumliche Ausrichtung) durchgeführt. Der Realignmentprozess, auch *Rigid Body Transformation* genannt, behandelt das Gehirn als einen festen Körper und verändert die Ausrichtung des Gehirns über sechs Parameter: *Translation* (Verschiebung) in allen drei Dimensionen (x-, y- und z-Achse) und *Rotation* (Drehung) um die drei Achsen (x-, y- und z-Achse) (Ashburner & Friston, 1997). Diese Parameter können als zusätzliche Regressoren bei der Erstellung der *Designmatrix* mit aufgenommen werden (siehe Abschnitte 2.2.5.2.4. und 3.1.4.4.1.).

⁴ im Folgenden werden SPM2-Begriffe/Befehle kursiv dargestellt

Schwächen der räumlichen Ausrichtung sind, dass 1. bei zu starken Kopfbewegungen die räumliche Neuausrichtung die dadurch verursachten Artefakte nicht mehr auffangen kann, 2. selbst das perfektste *Realignment* nicht jede bewegungskorrelierte Varianz aufklären kann und 3. durch Bewegung das magnetische Feld verändert wird (es wird inhomogener) und dadurch das fMRT-Signal verwischt.

2.2.5.1.2. Standardisierung (spatial normalization)

Während einer Datenerhebung werden normalerweise mehrere Versuchspersonen gemessen und anschließend miteinander verglichen. Da sich die Gehirne verschiedener Probanden in Größe, Ausrichtung und Form voneinander unterscheiden, werden in einem Normalisierungsprozess alle Gehirne einem Standardgehirn angeglichen, d. h. in einen gemeinsamen, stereotaktischen Raum gebracht. Wenn dann die gleichen Voxels in den unterschiedlichen Gehirnen der Probanden die gleichen anatomischen Areale repräsentieren, erlaubt dies, die Aktivierungen zwischen Probanden miteinander zu vergleichen. Des Weiteren erleichtert die Anpassung der Gehirne an ein Standardgehirn die Kommunikation zwischen verschiedenen Forschergruppen, da bestimmte Koordinaten immer gleichen Hirnarealen entsprechen. Das Standardgehirn wird auch als *Template* (z. B. *EPI-Template* des Montreal Neurological Institute/MNI, (Evans, Kamber, Collins, & MacDonald, 1994)) oder Schablone bezeichnet. Die Anpassung oder Transformation der einzelnen Gehirne der Probanden an das *EPI-Template* geschieht über zwölf lineare Parameter: *Translation* (Verschiebung) und *Rotation* (Drehung) in allen drei Dimensionen (x-, y- und z-Achse) sowie *Zoom* (Strecken und Stauchen in alle Richtungen) und *Shearing* (Scheren in allen drei Dimensionen).

2.2.5.1.3. Räumliches Glätten (spatial smoothing)

Ein weiterer entscheidender Schritt in der Vorverarbeitung der Daten ist das räumliche Glätten/Filtern (*spatial smoothing*) der Aufnahme, wodurch sich allerdings die Präzision der räumlichen Aufnahme verschlechtert. Der Vorteil des Glättens besteht darin, dass sich das Signal-Rausch-Verhältnis der Aufnahme verbessert, indem Rauschen in hohen räumlichen Frequenzen beseitigt und gleichzeitig der Vergleich zwischen verschiedenen Versuchspersonen, durch Beseitigung kleiner Frequenzunterschiede im Signal, erleichtert wird. Beim Glättungsprozess wird jeder Datenpunkt mit einer Kurve in

Form einer dreidimensionalen Normalverteilung multipliziert, die möglichst der Form des gewünschten Signals ähneln sollte. Die Frequenzen, die dann den Frequenzen der dreidimensionalen Filterkurve ähneln, werden verstärkt, diejenigen die nicht passen, werden herausgefiltert. Dabei kommt es zu einer Bündelung der Voxels, so dass sich die Daten einem Gauss-Feld annähern. Die Weite der Filterkurve ($FWHM^5$) beträgt typischerweise das zwei- bis dreifache der Voxelgröße. Dabei gilt, dass der Filter umso größer gewählt werden sollte, je größer das untersuchte Hirnareal ist. Zusammenfassend gilt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Voxels die Signifikanzschwelle erreichen, abnimmt, dagegen die Wahrscheinlichkeit ansteigt, bedeutsame größere Aktivierungscluster zu finden.

2.2.5.2. Statistische Analyse der fMRT-Daten

2.2.5.2.1. Modellspezifikation und Parameterschätzung

Nach der Vorverarbeitung der Daten wird in einem nächsten Schritt die statistische Analyse der Daten vorbereitet. Hierbei wird zunächst eine *Designmatrix* erstellt (*fMRI: Design and Data*), die die beobachteten Daten vorhersagen soll (siehe Abbildung 3). Dabei entspricht jede Spalte einer Stimulusvariable (z. B. Aktivierungs- oder Kontrastbedingung) und jede Zeile einer kompletten Aufnahme des Gehirns (z. B. 25 Schichten) (siehe Abbildung 3). Bei der Erstellung der *Designmatrix* kann auf verschiedene Weise vorgegangen werden: Eine Möglichkeit besteht darin, alle Probanden inklusive aller Aufnahmen in eine *Designmatrix* aufzunehmen (siehe *Fixed Effects Analysis*; Abschnitt 2.2.5.2.5), die andere Möglichkeit wäre, für jede Versuchsperson eine separate *Designmatrix* zu erstellen (siehe *Random Effects Analysis*; Abschnitt 2.2.5.2.5). In einem anschließenden Schätzungsprozess (*Data-Estimation*) wird die *Designmatrix* dem tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Aktivierung eines jeden Voxels der hämodynamischen Antwortfunktion (HRF) bestmöglich angepasst. Als Ergebnis erhält man die *Parameter Matrix*, mit der im Folgenden gerechnet werden kann.

⁵ Die Glättung wird mittels eines Gauss-Kernels durchgeführt, dessen Spannweite ($FWHM = \text{Full Width Half Maximum}$) in Millimetern angegeben wird

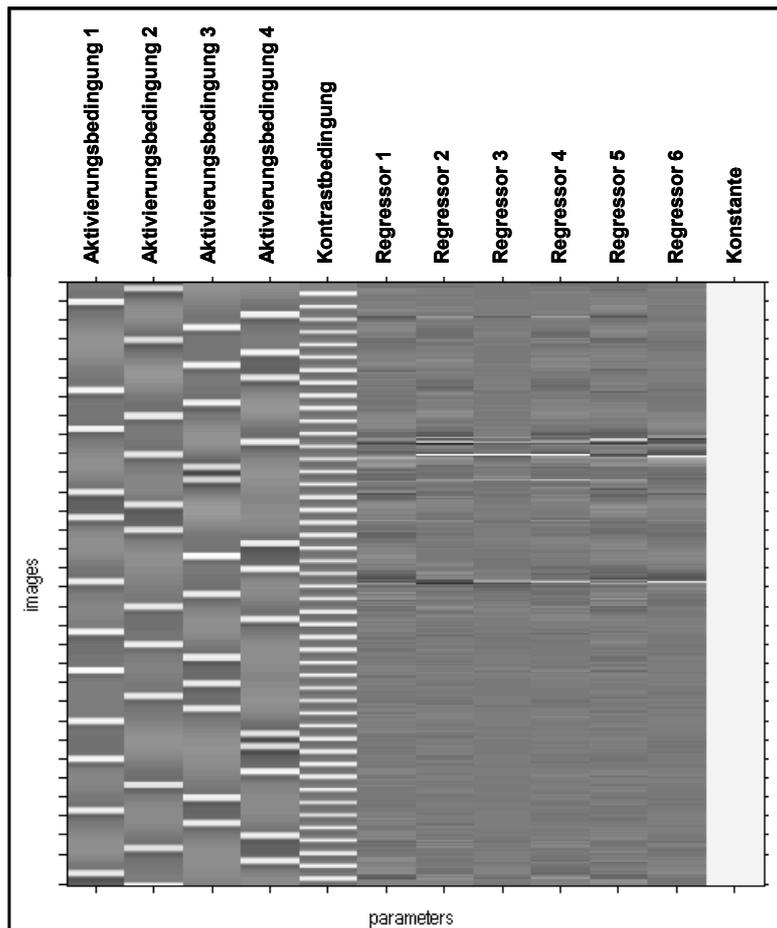


Abbildung 3: Beispiel einer Designmatrix (vier Aktivierungsbedingungen, eine Kontrast- bzw. Ruhebedingung sowie sechs Bewegungsparameter bzw. Regressoren; siehe Abschnitt 2.2.5.2.4.)

2.2.5.2.2. Ergebnisberechnung (Inferenzstatistik)

Das Ziel der statistischen Analyse ist, für jedes Voxel im Gehirn den Schwellenwert zu errechnen, unter dem es die Signifikanzgrenze erreicht. Dafür werden t -Tests für jede Spalte der *Designmatrix* (d. h. für jede Bedingung) oder für Kombinationen von Spalten/Bedingungen berechnet, um zu ermitteln, welche Voxels bzw. deren Aktivierung sich unter welcher Bedingung signifikant von Null unterscheiden. Für welche Bedingung ein t -Test gerechnet werden soll, lässt sich über die Kontraste definieren. Soll für eine Bedingung alleine (z. B. Aktivierungsbedingung A) getestet werden, welche Voxels/Cluster signifikant aktiviert werden, muss diese Bedingung im *Contrast Manager* auf +1 gesetzt werden. Alle anderen Bedingungen erhalten dann automatisch eine Null. Wenn zwei Bedingungen gegeneinander getestet werden sollen, müsste

dementsprechend eine Bedingung auf +1 (z. B. Aktivierungsbedingung A) und die andere auf -1 (z. B. Ruhe oder Aktivierungsbedingung B) gesetzt werden. In der Ergebnisausgabe (*statistical map*) wären dann alle Voxels in der so genannten *SPM-T Map* abgebildet, die unter der ersten Bedingung (in Abbildung 4: Wortgenerierung) signifikant stärker aktiviert wären als unter der anderen Bedingung (in Abbildung 4: Ruhe). Die Ergebnisausgabe kann zudem dafür genutzt werden, die Aktivierungen auf anatomischen, d. h. T₁-gewichteten Aufnahmen abzubilden, um sich so ein genaueres Bild von den interessierenden Bereichen machen zu können. Des Weiteren können die exakten Koordinaten sowie der individuellen Signifikanzniveaus einzelner Voxels oder Cluster angezeigt werden.

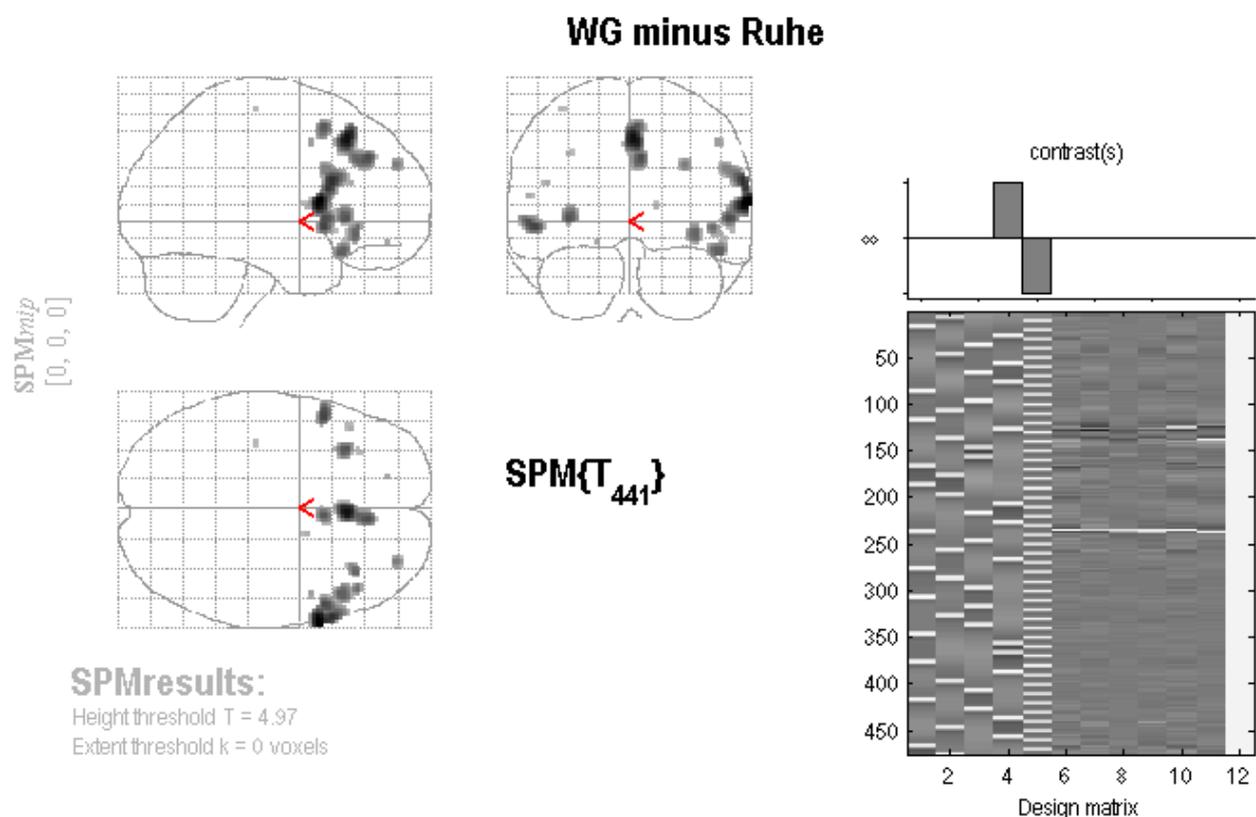


Abbildung 4: *SPM T-Map* (Beispielkontrast: „Wortgenerierung minus Kontrollbedingung/Ruhe“; Daten stammen von einer zufällig ausgewählten Versuchsperson der vorliegenden Studie)

2.2.5.2.3. Wahl der statistischen Prüfgröße

Bei der Wahl der statistischen Prüfgröße müssen hauptsächlich zwei Dinge beachtet werden: Es muss einerseits ein statistischer Schwellenwert gewählt werden, bei dem eine möglichst große Chance besteht, relevante Aktivierungen zu finden, bei dem aber auch gleichzeitig nicht zu viele „*false alarms*“ angezeigt werden. Da bei jeder Analyse für jedes Voxel ein statistischer Test gerechnet wird (d. h. hunderttausende einzelner Tests) und dabei die Wahrscheinlichkeit einzelner falsch positiver Antworten relativ hoch ist, muss für diese Art von Fehler eine Korrektur (*family wise error correction*, *Bonferroni* etc.) durchgeführt werden. Problematisch erweist sich hierbei, dass kleine zu erwartende Effekte auch schneller verschwinden, wenn eine starke Korrektur der Daten durchgeführt wird. Bei einem Alphaniveau von $p < .10$ würden mit Sicherheit viele Voxels oder auch Cluster aktiviert sein, die Wahrscheinlichkeit darunter falsch positive Antworten zu finden, läge allerdings auch bei 10%. Bei 100.000 Voxels bzw. einzelnen Testungen würde das bedeuten, 10.000 falsch positive Antworten zu erhalten. Bei einer *Bonferroni-Korrektur* würde das Alphaniveau durch die Anzahl der Testungen geteilt werden ($p = .10/100.000$), infolgedessen aber, durch das sehr strenge Alphaniveau, auch viele wahre Effekte verschwinden würden.

Bei SPM2 können „*false alarms*“ auch über die konservative Berechnung des *FWE* (*family wise error*) korrigiert werden (siehe Abschnitt 3.1.4.5.1.). Zudem können gewisse Clustergrößen im Vorhinein definiert, eine *false discovery rate correction* (*FDR*) durchgeführt oder *Region-of-Interest* (*ROI*) Analysen gerechnet werden (siehe Abschnitte 2.2.5.3.2. und 3.1.4.6.1). Bei *Region-of-Interest* Analysen werden gezielt Aktivierungen in kleinen, vorher definierten Regionen miteinander verglichen. Ein solches Vorgehen würde davon profitieren, dass eine deutlich geringere Anzahl an Korrekturen vorgenommen werden müsste.

Zusammenfassend gilt, dass möglichst viele Wiederholungen einer Bedingung sowie möglichst viele Probanden gemessen werden sollten, um ein sicheres Signal bzw. Ergebnis zu bekommen, aus dem schließlich auch sinnvolle Schlussfolgerungen gezogen werden können.

2.2.5.2.4. Bewegungskorrektur

Die Bewegungskorrektur ermöglicht, die sechs Bewegungsparameter (*Translation* und *Rotation* jeweils über die x-, y-, und z-Koordinaten) als zusätzliche Regressoren bei der Erstellung der *Designmatrix* mit aufzunehmen, um auf diese Weise Varianzanteile aufzuklären, die auf systematische oder unsystematische Bewegungen zurückzuführen sind (siehe Abschnitt 2.2.5.1.1.).

2.2.5.2.5. Statistische Modelle (RFX vs. FFX)

Bei der Analyse der Daten muss zwischen zwei Modellen unterschieden werden: Der *Fixed Effects Analysis* (auch „*first-level analysis*“) und der *Random Effects Analysis* (auch „*second-level analysis*“). Mit Fixed Effects Analysen (FFX-Analysen) können Aussagen zu typischen Charakteristika der untersuchten Stichprobe getroffen werden. Hierbei wird nur die Varianz innerhalb der Gruppen betrachtet („*within subject variance*“) (Adcock et al., 2003). Nicht geeignet sind FFX-Analysen, um die Ergebnisse auf die Gesamtpopulation zu generalisieren. Hierfür eignen sich Random Effects Analysen (RFX-Analysen), bei der die gemittelten Aktivierungen der teilnehmenden Probanden verglichen werden und so das Gesamtergebnis nicht von einzelnen Extremwerten zu stark verzerrt wird. Bei RFX-Analysen wird die Varianz innerhalb und zwischen den Gruppen betrachtet („*within subject variance*“ und „*between subject variance*“) (Adcock et al., 2003). Da bei diesem Vorgehen zuerst die individuellen Analysen gerechnet werden („*first-level analysis*“), d. h. für jede Versuchsperson eine separate Rechnung und erst anschließend mit den einzelnen Kontrasten der verschiedenen Probanden weitergerechnet wird (den so genannten „*con-files*“), spricht man hierbei auch von „*second-level analysis*“. Da es hierbei insbesondere um die Generalisierung der Ergebnisse auf die Gesamtpopulation geht, sind für diese Art von Analysen größere Versuchspersonenstichproben unabdingbar (Friston, Holmes, Price, Buchel, & Worsley, 1999; Friston, Holmes, & Worsley, 1999).

2.2.5.3. Auswertung der funktionellen Daten über fMRT-Lateralitätsindex (fMRT-LI)

Generell gibt es mehrere Möglichkeiten, die funktionellen Daten auszuwerten. Es können Analysen zu bestimmten Strukturen (Morphometrie) vorgenommen, Regionen

miteinander verglichen oder Lateralitätsindizes berechnet werden. Da die Berechnung von Lateralitätsindizes für die vorliegende Studie von zentraler Bedeutung ist, soll dies im Folgenden genauer betrachtet werden.

2.2.5.3.1. Gütekriterien der fMRT-LI-Analyse

Je nachdem, auf welche Art und Weise eine fMRT-LI-Analyse durchgeführt wird, können die Ergebnisse beträchtlich variieren (Jansen et al., 2004; Jansen et al., submitted). Es ist daher entscheidend, die Wahl der Methode zur Berechnung des Lateralitätsindex so nachvollziehbar wie möglich zu begründen und gleichzeitig über die Angabe der Ergebnisse anderer Berechnungsarten zu informieren. Nur so kann die Willkürlichkeit bei der Präsentation der Ergebnisse vermieden werden. Bei der fMRT-LI-Analyse wird theoretisch zwischen den Gütekriterien „Reproducibility“ und „Robustness“ der Methode unterschieden (Jansen et al., submitted). Beide Kriterien sind ihrerseits wiederum abhängig von der Wahl der Region-of-Interest (ROI) und dem verwendeten Aktivitätsmaß (siehe Abbildung 5):

Reproducibility

Reproducibility eines fMRT-LI meint, in wie weit die gleichen Ergebnisse bei verschiedenen Messungen erreicht werden, sozusagen die Zuverlässigkeit/Reliabilität einer Messung.

Robustness

Unter Robustness versteht man die Gültigkeit einer Messung, d. h. inwieweit die Berechnung eines fMRT-LI unabhängig von externalen Parametern ist. Als externe Parameter gelten neben der Wahl der Region-of-Interest (ROI) und des Aktivitätsmaßes u. a. die Kooperation der Probanden, MR-Aufnahmeparameter (Wahl der TR, TE oder Schichtdicke) oder das Design der Studie.

2.2.5.3.2. Erstellung der Region-of-Interest (ROI)

Bei der Erstellung der Region-of-Interest kann zwischen zwei Varianten unterschieden werden (siehe Abbildung 5):

Funktionelle ROI

Bei der funktionellen ROI wird ein Aktivierungsmuster, beispielsweise abgeleitet aus Ergebnissen einer Pilot-Studie mit dem gleichen Untersuchungsdesign, als Grundlage zur Erstellung der ROI gewählt. Hierbei kann das Problem auftreten, dass zusätzlich zu den interessierenden Regionen auch Regionen außerhalb der „*actual area of interest*“, sogenannte Regions-of-no-Interest (RONI) mit eingeschlossen werden (Jansen et al., submitted).

Anatomische ROI

Anatomische ROI werden aufgrund vorbestehenden anatomischen Wissens erstellt und bieten daher nur eine relativ grobe Schätzung der interessierenden Hirnareale. Des Weiteren umfassen anatomische ROI häufig Gebiete, die bei der untersuchten Aufgabe nicht beteiligt sind oder sparen relevante Aktivierungen aus, die außerhalb der anatomisch spezifizierten Region liegen. Dies würde zu einer Über- bzw. Unterschätzung der jeweiligen Lateralitätsindizes führen.

Ein zweistufiges alternatives Vorgehen schlugen Adcock und Mitarbeiter vor (Adcock et al., 2003). Hiernach sollten in einem ersten Schritt nur Voxels, die bei einem liberalen Schwellenwert von $p < .01$ in 80% der Versuchspersonen aktiviert waren, zur Erstellung der ROI herangezogen werden. Nach Spiegelung dieser funktionellen ROI zur anderen Hemisphäre sollte in einem zweiten Schritt zusätzlich anatomisches Wissen genutzt werden, um zwischen Regions-of-Interest (ROI) und Regions-of-no-Interest (RONI) zu unterscheiden.

2.2.5.3.3. Wahl des Aktivitätsmaßes

Bei der Wahl des Aktivitätsmaßes kann grundsätzlich zwischen einer Berechnung des fMRT-LI nach Anzahl aktivierter Voxels (LI_{extent}) und einer Berechnung des fMRT-LI nach der Größe des Signalwechsels zwischen zwei Bedingungen ($LI_{\text{magnitude}}$) unterschieden werden (siehe Abbildung 5). In beiden Fällen liegen die fMRT-LI-Werte auf einem Kontinuum zwischen +1 (linkshemisphärische Aktivierung) und -1 (rechtshemisphärische Aktivierung).

L_{extent}

Bei der Berechnung des fMRT-LI nach Anzahl aktivierter Voxels kann auf zweierlei Arten vorgegangen werden: Häufigste verwendete Methode ist es, einen fixen Schwellenwert (zwischen $p < 10^{-2}$ und 10^{-8}) zu wählen, oberhalb dessen alle aktivierten Voxels mit in die Berechnung des fMRT-LI eingehen. Problematisch ist hierbei, dass aufgrund zu unterschiedlicher Aktivierungsniveaus zwischen verschiedenen Probanden inter-subjekt Vergleiche kaum sinnvoll erscheinen. Eine alternative Methode wäre, variable, individuell angepasste Schwellenwerte zu wählen. Specht und Kollegen sowie Klöppel und Kollegen bedienen sich dieser Variante, indem sie eine festgelegte Mindestanzahl aktivierter Voxels bestimmen und den Schwellenwert sukzessiv individuell so anpassen, dass die erforderte Menge aktivierter Voxels bei jeder Versuchsperson erreicht wird (Klöppel & Büchel, 2005; Specht, Willmes, Shah, & Jancke, 2003). Subjektiv und damit problematisch erscheint hierbei laut Knecht allein die Wahl der Anzahl aktivierter Voxels (Knecht et al., 2003). Um die Ergebnisse bei der Berechnung des fMRT-LI_{extent} (nach Anzahl aktivierter Voxels) nachvollziehbar und objektivierbar zu gestalten, bietet es sich laut Jansen und Mitarbeitern an, die Ergebnisse generell in Lateralisationskurven darzustellen (Jansen et al., submitted).

L_{magnitude}

Bei der Berechnung des fMRT-LI nach Ausmaß des Signalunterschiedes zwischen zwei Bedingungen (L_{magnitude}) werden die *t*-Werte als Maßstab genommen. Auch dabei kann auf zweierlei Arten vorgegangen werden: Bei der einfachen, allerdings auch schwächeren Variante, werden alle Voxels einer ROI zur Berechnung des fMRT-LI herangezogen. Fernández und Mitarbeiter wählen dagegen eine alternative Variante, bei der in zwei Schritten vorgegangen werden muss: Als erstes wird ein Mittelwert der *t*-Werte aus den 5% der Voxels mit dem höchsten Aktivierungsniveau errechnet. Anschließend wird der Schwellenwert (ab dem aktivierte Voxels in die Berechnung des fMRT-LI eingeschlossen werden sollen) mit 50% dieses errechneten maximalen Wertes gewählt (Fernández et al., 2003). Auf diese Weise können auch fragwürdige Ergebnisse (z. B. fMRT-LI > 1 oder < -1), die Aufgrund von Deaktivierungen einer Hemisphäre zustande kommen könnten, vermieden werden (Jansen et al., submitted).

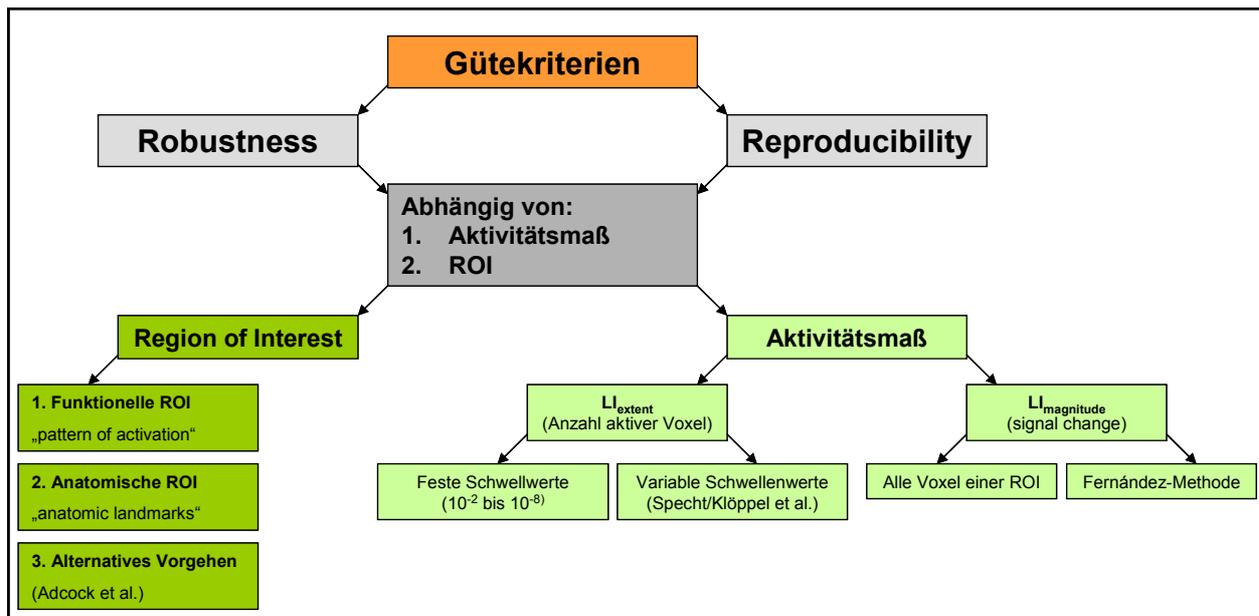


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Gütekriterien einer fMRT-LI-Analyse, Aktivitätsmaß und ROI-Analyse

2.3. Funktionelle transkranielle Dopplersonographie (fTCD)

Die funktionelle transkranielle Dopplersonographie (fTCD) ist ein nichtinvasives Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung der Blutflussgeschwindigkeit (CBFV) in den drei großen Hirnarterien (siehe Abschnitte 2.3.1. und 2.3.2. sowie Abbildung 8). Wegen der hohen zeitlichen Auflösung dieser Technik ist es möglich, sehr schnelle Veränderungen des Blutflusses zu registrieren. Erstmals beschrieben wurde die Technik 1982 von Aaslid, Markwalder und Nornes (Duschek & Schandry, 2003).

2.3.1. Physikalische Grundlagen der fTCD

Um die Blutflussgeschwindigkeit innerhalb der großen mittleren Hirnarterie (MCA) zu messen, müssen bilateral Ultraschallsonden zwischen den Schläfen und dem oberen Ohransatz mittels einer Kopfhalterung (marc600, SPENCER TECHNOLOGIES) fixiert werden (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Kopfhalterung und Kugelgelenk der fTCD

Ein Kugelgelenk ermöglicht die Feinjustierung des Beschallungswinkels. Die Beschallung der MCA erfolgt in nahezu rechtem Winkel durch das so genannte Knochenfenster (auch: transtemporales Fenster), welches sich durch seine geringe Knochendichte auszeichnet und daher eine höhere Durchlässigkeit für den Ultraschall bietet. Um eine saubere und unverzerrte Aufzeichnung zu erhalten, wird vor der Messung ein Kontaktgel auf die Sonden aufgetragen. So wird verhindert, dass Luftzwischenräume die Schallausbreitung beeinträchtigen.

Jede der basalen Hirnarterien (ACA, MCA, PCA) kann von diesem Knochenfenster aus beschallt und abgeleitet werden. Das zu untersuchende Gefäß kann anhand bestimmter Charakteristika, u. a. Tiefe der Sonographie (meist 50 mm) und Fließrichtung des Blutstroms, zugeordnet werden (Duschek & Schandry, 2003).

Die gemessenen Daten werden auf dem Multi-Dop® T (DWL Elektronische Systeme GmbH), für beide Hemisphären getrennt, angezeigt. Hierbei besteht die Möglichkeit, numerische sowie bildliche Daten zu bekommen. Die so genannte Fast-Fourier-Transformation ermöglicht eine dreidimensionale, kontinuierliche Abbildung der Doppler-Daten (siehe Abbildung 7). Die Zeit wird hierbei auf der horizontalen Ebene abgetragen, die Blutflussgeschwindigkeit (oder Frequenz) auf der vertikalen; die Intensität des Blutflusses (Amplitude) wird durch die Farbstärke/Helligkeit gekennzeichnet. Zusätzlich wird als zeitlich kontinuierliches CBFV-Maß die *Einhüllende* (engl. „envelope curve“) des Doppler-Spektrums verwendet (Deppe et al., 2004). Diese Linie repräsentiert die

maximale Geschwindigkeit unter Berücksichtigung des Herzzyklus. In den meisten fTCD-Studien wird genau dieser zeit- und intensitätsgewichtete mittlere CBFV-Wert, auch besonders wegen seiner guten Resistenz gegen Artefakte, für die weiteren Berechnungen genutzt (Stroobant & Vingerhoets, 2000).

Zusätzlich können die pulsierenden Strömungsgeräusche über Lautsprecher für die rechte und linke Ableitung separat eingespielt und so die Qualität des Audio-Dopplersignals beurteilt werden.

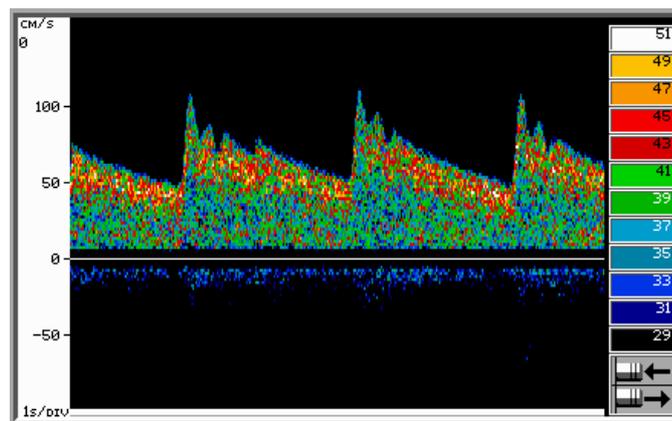


Abbildung 7: Fast-Fourier-Transformation (fTCD) (Duschek & Schandry, 2003)

Werden bewegte Objekte, z. B. rote Blutkörperchen/Erythrozyten, beschallt, reflektieren sie die Schallwellen mit einer höheren oder niedrigeren Frequenz. Die Differenz zwischen ausgesandter und empfangener Frequenz wird Doppler-Frequenzverschiebung oder Doppler-Effekt genannt. Aus der gemessenen Frequenzverschiebung kann (unter Berücksichtigung der verwandten Ultraschallfrequenz, der Schallgeschwindigkeit innerhalb des Gewebes und des Beschallungswinkels) die Geschwindigkeit und die Richtung des bewegten Objekts berechnet werden. Je höher die Geschwindigkeit des sich bewegenden Objektes ist, desto größer ist die Differenz zwischen ausgesandeter und zurückgesandeter Frequenz. Bewegt sich ein Objekt in die Richtung der Schallquelle, so ist die reflektierte Frequenz höher, während die Frequenz niedriger ist, wenn sich das Objekt von der Schallquelle weg bewegt. Für eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens sei an dieser Stelle auf Deppe und Kollegen verwiesen (Deppe et al., 2004).

2.3.2. Hirnanatomische Grundlagen der fTCD

Die mittels funktioneller transkranieller Dopplersonographie (fTCD) hauptsächlich beschallten Hirnarterien sind die *Arteria cerebri anterior* (ACA), die *Arteria cerebri media* (MCA) und die *Arteria cerebri posterior* (PCA) (siehe Abbildung 8).

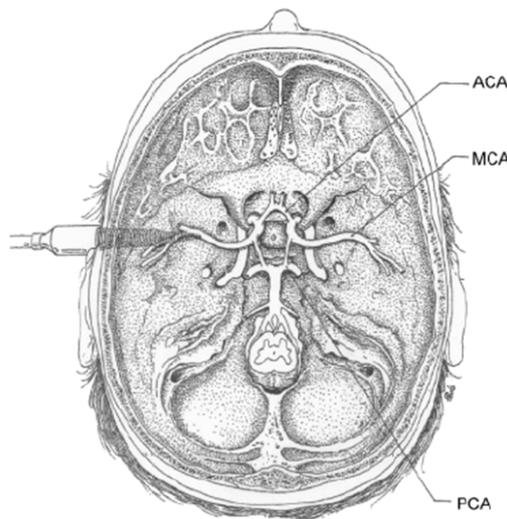


Abbildung 8: Die drei großen Hirnarterien (Duschek & Schandry, 2003)

Da in der vorliegenden Studie der Blutfluss in der MCA von zentraler Bedeutung war, wird im Folgenden hierauf näher eingegangen:

Die Hauptversorgungsgebiete der MCA umfassen den lateralen Frontallappen, den lateralen Anteil des Parietallappens sowie Teile des Temporallappens, der Capsula interna, Capsula externa, Capsula extrema, der Corona radiata und der Basalganglien (siehe Abbildung 9).

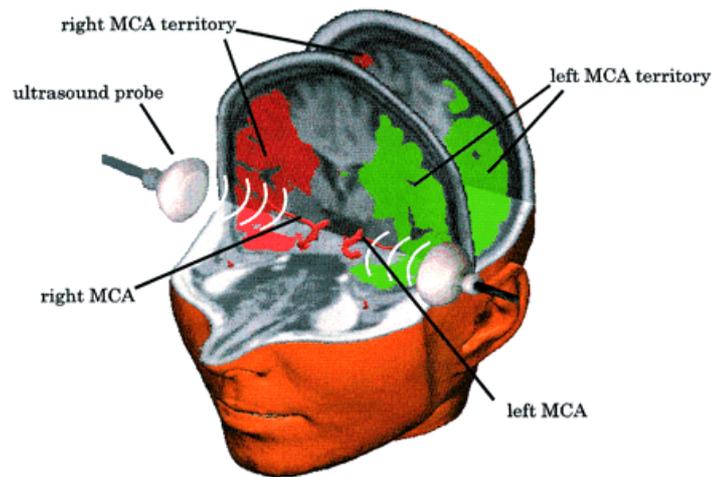


Abbildung 9: Hauptversorgungsgebiete der MCA (Knecht, Deppe et al., 2000)

Da die MCA für 80% des Blutflusses in jeder Hemisphäre verantwortlich ist, werden somit auch mehrere funktionelle Zentren über diese Arterie versorgt (siehe Abbildung 10).

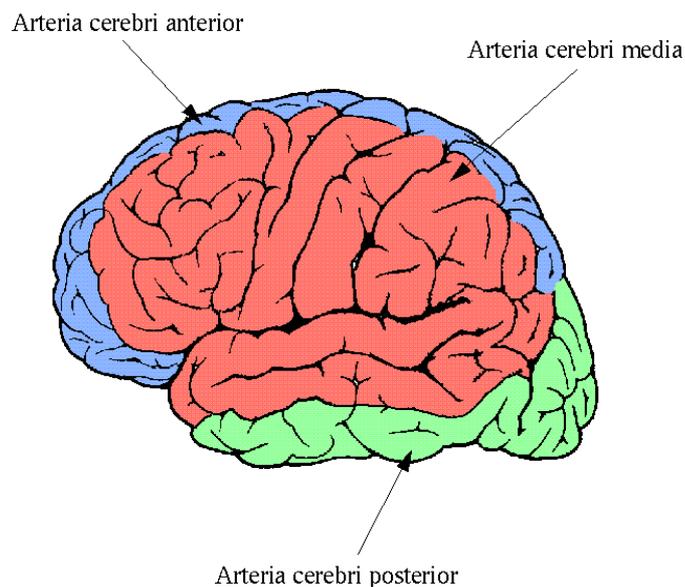


Abbildung 10: Funktionelle Zentren im Versorgungsgebiet der MCA (online verfügbar unter: [www.http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik-joerg/sgtutorial/blutversorgung.html](http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik-joerg/sgtutorial/blutversorgung.html); Stand: 12.12.2005)

Dies sind u. a. der motorische Kortex, der primäre somatosensorische Kortex, das gustatorische Gebiet, der primär auditive Kortex, das Wernicke-Areal und, von zentraler

Bedeutung für die vorliegende Studie, das Sprachzentrum von Broca bzw. der inferior-frontale Kortex (siehe Abschnitte 2.6.1.2. und 2.6.1.5. sowie Abbildungen 10 und 15). Der inferior-frontale Kortex (auch Broca-Areal) mit eher expressiven Funktionen am Fuß der dritten Stirnhirnwindung gelegen (BA 44/45 und 47; s. u.), wird von den vorderen Ästen der MCA versorgt.

Das eher für rezeptive Sprachfunktionen relevante Wernicke-Areal liegt am rückwärtigen Teil des Schläfenlappens sowie in der ersten Temporalwindung und wird über die *Arteria temporalis posterior*, einem Ast der MCA, mit Blut versorgt.

2.3.3. Vor- und Nachteile funktioneller transkranieller Dopplersonographie (fTCD)

Hauptargumente für Messungen mittels funktioneller transkranieller Dopplersonographie (fTCD) sind deren leichte Handhabbarkeit, deren Nicht-Invasivität (und damit deren Wiederholbarkeit), die hohe zeitliche Auflösung (im Millisekundenbereich) und die geringen Kosten der Methode im Vergleich zu alternativen Techniken, z. B. der funktionellen Kernspintomographie (Kischka, Wolf, & Wallesch, 1997; von Reutern & von Büdingen, 2000). Hinzu kommt, dass die fTCD relativ robust gegen Bewegungsartefakte ist und somit auch im begrenzten Maße ein Sprechen während der Untersuchung erlaubt. Vorteilhaft erweist sich die fTCD auch bei der Behandlung von Patienten mit Herzschrittmachern oder Metallimplantaten. Kindern oder ängstlichen Patienten bleibt außerdem die Enge des Kernspintomographen erspart (Knake et al., 2003). Hauptnachteil der funktionellen transkraniellen Dopplersonographie ist die geringe räumliche Auflösung, die nur einen Rückschluss auf die Gesamtaktivität einer Hemisphäre oder das gesamte Versorgungsgebiet einer der drei großen Hirnarterien zulässt. Eine weitere Einschränkung ist, dass ein Teil der Bevölkerung (bis zu 10% bei älteren Probanden) über kein für eine Messung adäquates Knochenfenster verfügt (Duschek & Schandry, 2003; Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998). Insbesondere bei Älteren können zudem pathologische Gefäßveränderungen, wie z. B. Verengungen oder Verschluss einer Arterie, die Ergebnisse beeinflussen.

2.3.3.1. Gütekriterien von fTCD-Messungen

2.3.3.1.1. Reliabilität

Mehrere Studien konnten die hohe Zuverlässigkeit der funktionellen transkraniellen Dopplersonographie nachweisen. Knecht und Kollegen setzten dabei zur Bestimmung der sprachdominanten Hemisphäre eine Wortgenerierungsaufgabe ein und fanden in zehn Wiederholungsmessungen bei der gleichen Probandin eine hohe Übereinstimmung bezüglich der Sprachlateralisation (Retest-Reliabilität von $r = .95$) (Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998) (siehe Abbildung 11). In einer Überblicksstudie über die Methode der fTCD berichten Stroobant und Vingerhoets ausführlich über Wiederholungsmessungen, die allerdings ausschließlich während der Ruhebedingungen erhoben wurden (Baumgartner, Mathis, Sturzenegger, & Mattle, 1994; Bay-Hansen, Ravn, & Knudsen, 1997; Maeda et al., 1990; Stroobant & Vingerhoets, 2000; Totaro, Marini, Cannarsa, & Prencipe, 1992). Die gefundenen Reliabilitätswerte lagen dabei im Bereich zwischen $r = .71$ und $r = .95$. In einer fTCD-Studie mit 16 Kindern im Alter von 2 bis 9 Jahren fanden Lohmann und Mitarbeiter bei einer Bildbeschreibungsaufgabe eine Re-Test Reliabilität von $r = .87$ ($p < .05$) nach einem Monat (Lohmann, Drager, Muller-Ehrenberg, Deppe, & Knecht, 2005).

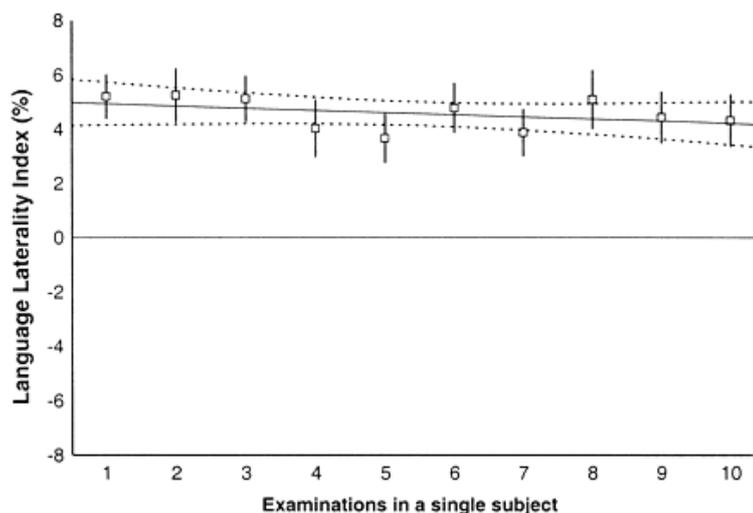


Abbildung 11: fTCD-Lateralitätsindizes bei 10 Wiederholungsmessungen an einer Probandin (Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998)

2.3.3.1.2. Validität

In einer Vergleichsstudie zwischen fMRT und fTCD zeigte sich, dass der Variationskoeffizient⁶ bei Wiederholungsmessungen für die fTCD ($VK = .17$) geringer war als für die fMRT ($VK = .43$) (Deppe, Knecht, Papke, Hennigsen, & Ringelstein, 1999) (siehe Abbildung 12). Danach liefert eine fTCD-Ultraschalluntersuchung wesentlich konstantere Werte bei der Bestimmung der sprachrelevanten Hemisphäre als die funktionelle Kernspintomographie (Deppe et al., 2004).

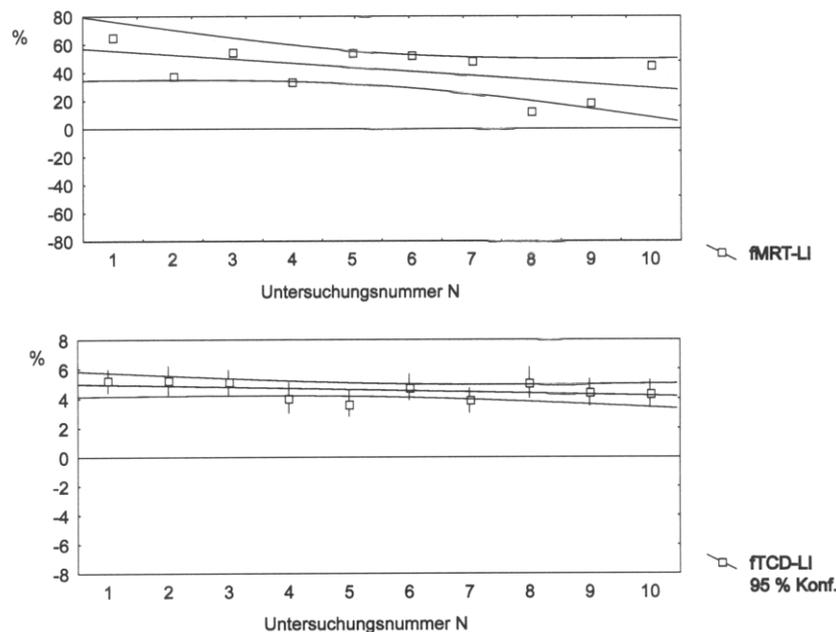


Abbildung 12: Vergleich der Lateralitätsindizes von 10 aufeinander folgenden fMRT und fTCD Messungen (Deppe et al., 2004)

In zahlreichen Validierungsstudien wurde die fTCD-Methode mit anderen (bildgebenden) Verfahren und unter verschiedenen Bedingungen verglichen (Deppe et al., 2000; Knecht, Deppe, & Ringelstein, 1999; Schmidt et al., 1999; Silvestrini, Troisi, Matteis, Cupini, & Caltagirone, 1995). Schmidt und Kollegen konnten eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen fTCD und fMRT bei visuellen Unterscheidungsaufgaben feststellen. In einem weiteren Vergleich zur fMRT bei der Bestimmung des Lateralitätsindex (fTCD-LI) mit der Wortgenerierungsaufgabe (siehe Abschnitt

⁶ Variationskoeffizient (VK): Variation der Indizes Standardabweichung und Mittelwert über mehrere Messungen

2.6.1.4.) erwies sich keine Methode der anderen als überlegen (Deppe et al., 2004) (siehe Abbildung 13).

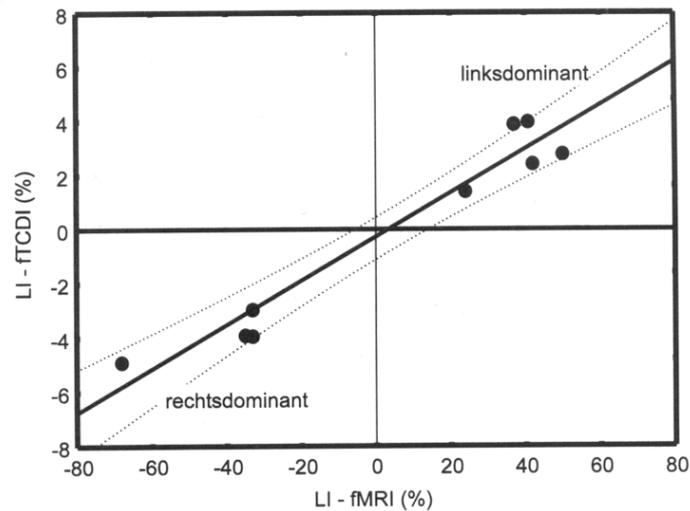


Abbildung 13: Vergleich der mittels fTCD und fMRT bestimmten Lateralitätsindizes für 9 Probanden (Deppe et al., 2004)

Identische Resultate bezüglich der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre fanden Knecht und Mitarbeiter in einer Validierungsstudie der funktionellen transkranialen Dopplersonographie am Wada-Test an 15 Patienten (siehe Abbildung 14).

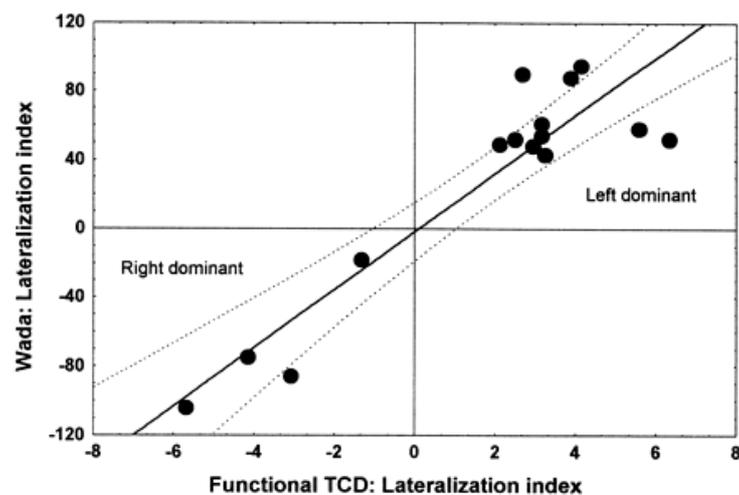


Abbildung 14: Vergleich der mittels Wada-Test und fTCD bestimmten Lateralitätsindizes für 15 Patienten (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998)

2.3.4. Auswertung der funktionellen TCD-Daten

Zur Analyse der ereignisbezogenen Veränderungen der CBFV existiert das Softwareprogramm „AVERAGE“ (Version: 1.85e), bei dem die ereigniskorrelierten, zeitlich kontinuierlichen fTCD-Signale gemittelt werden (*averaging*) und anschließend für die statistische Auswertung zur Verfügung stehen (Deppe, Knecht, Henningsen, & Ringelstein, 1997). Hierbei können die mittlere prozentuale Blutflussveränderung in der linken und rechten MCA (VI bzw. Vr) zum Baseline-Intervall, der mittlere Aktivierungsindex (fTCD-AI) sowie der fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) berechnet werden. Der fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) ist definiert als die gemittelte Differenz des Blutflusses zwischen beiden Hemisphären während eines zuvor definierten Intervalls. Der mittlere Aktivierungsindex (fTCD-AI) bezeichnet die über beide Hemisphären (VI und Vr) gemittelte prozentuale Zunahme bzw. Abnahme der Durchblutungsgeschwindigkeit während der Intervalle (siehe Abschnitt 3.2.4.3. sowie Abbildung 33 und 34).

Genauerer zu den einzelnen Analyseschritten findet sich in Abschnitt 3.5 im AVERAGE-Handbuch (Deppe, 1999, 2002) oder in „Funktionelle Transkranielle Doppler Sonographie – Methodik zu Erfassung ereignisbezogener Gehirnaktivitätsänderungen“ (Deppe, 2000).

2.4. Vergleichende Bewertung von fMRT und fTCD

Abschließend lässt sich sagen, dass beide Methoden ihre Vor- sowie Nachteile aufweisen (siehe Tabelle 1): Der Hauptvorteil der funktionellen Kernspintomographie liegt in ihrer guten räumlichen Auflösung, d. h. es können, im Gegensatz zur funktionellen transkraniellen Dopplersonographie, exakte Lokalisationen der an kognitiven Prozessen beteiligten Strukturen bzw. Regionen angegeben werden. Nachteilig erweisen sich dagegen insbesondere die hohen Kosten und großen Aufwendungen, die mit einer Kernspinuntersuchung verbunden sind, sowie ihre geringe zeitliche Auflösung.

Tabelle 1: Vergleichende Bewertung von fMRT und fTCD

	<i>fMRT</i>		<i>fTCD</i>
Invasivität	nein	=	nein
Kosten	hoch	<	niedrig
Flexibilität	fester Ort	<	mobil
Räumliche Auflösung	gute räumliche Auflösung	>	schlechte räumliche Auflösung
Zeitliche Auflösung	schwach	<	hoch
Ausschluss von Probanden	Implantate oder Schrittmacher	<	Keine Probleme bei verschiedenen Patientengruppen
	Probleme mit klaustrophobischen Probanden	<	Keine Probleme mit klaustrophobischen Patienten
	Unabhängig vom Knochenfenster	>	10% der Bevölkerung haben kein Knochenfenster
	Pathologische Gefäßveränderungen können erkannt werden	>	Pathologische Gefäßveränderungen werden nicht erkannt und können Ergebnisse beeinflussen
Reliabilität Sprachlateralisation	hoch	=	hoch
Anfälligkeit für Bewegung	stark	<	gering

2.5. Alternative Verfahren zur Bestimmung der Sprachlateralisation

2.5.1. Wada-Test

Der Natrium-Amytaltest, auch als Wada-Test bekannt, wurde erstmals 1949 zur Untersuchung der Sprachlateralisation eingesetzt (Blume, Grabow, Darley, & Aronson, 1973). Eine Injektion von Natrium-Amytal in die rechte oder die linke Arteria carotis führt zu einer kurzfristigen, reversiblen Funktionsblockierung der ipsilateralen Hemisphäre. Dies erlaubt für kurze Zeit, die Funktion einer Hemisphäre, z. B. bei der Durchführung einer Sprachaufgabe, isoliert zu beobachten. Aufgrund der Leistungen in Sprachtests können dann Rückschlüsse auf die Lokalisation der sprachdominanten Hemisphäre gezogen

werden. Heutzutage ist der Wada-Test das Standardinstrument in der prächirurgischen Diagnostik von Epilepsiepatienten (Van Emde Boas, 1999; Wada & Rasmussen, 1960). Generell muss bei Epilepsiepatienten vor einem operativen Eingriff zur Beseitigung des Epilepsieherdes sichergestellt werden, dass nicht Bereiche des Sprachzentrums durch die Operation beeinträchtigt werden. Ansonsten wären zwar viele Patienten nach der Operation anfallsfrei, dafür aber auch einige aphasisch. Nachteile der Natrium-Amytal-Methode sind ihre Invasivität, ein Morbiditätsrisiko von schätzungsweise 5% (Rausch et al., 1993), ihre Nichtwiederholbarkeit sowie das enge Zeitfenster bei der Durchführung von Leistungstests. Auch die unterschiedliche interindividuelle Reaktion auf das Narkotikum Amobarbital muss beachtet werden. Ein weiterer Nachteil zeigt sich bei der präoperativen Diagnostik von Epilepsie- oder Tumorpatienten, bei denen in der Nähe der Sprachareale operiert werden muss. Mittels Wada-Test lässt sich zwar die sprachdominante Hemisphäre bestimmen, eine genauere Lokalisation der Sprachregionen innerhalb der sprachdominanten Hemisphäre ist aber, anders als mit räumlich hochauflösenden bildgebenden Verfahren (siehe Abschnitte 2.2.2. und 2.4.), nicht möglich (Lurito & Dziedzic, 2001).

Aufgrund der beträchtlichen Nachteile der Natrium-Amytal-Methode wurden viele Versuche unternommen, nichtinvasive Alternativen zum Wada-Test bei der Lokalisation sprachrelevanter Areale zu entwickeln (siehe Abschnitte 2.6.1.4. und 2.6.4.).

2.5.2. Transkranielle Magnetstimulation (TMS)

Mit der transkraniellen Magnetstimulation können Hirnareale durch starke, kurzzeitig aufgebaute Magnetfelder vorübergehend funktionell ausgeschaltet und währenddessen spezielle Leistungstests vorgenommen werden (Jennum, Friberg, Fuglsang-Frederiksen, & Dam, 1994). Nachteil der Methode ist das erhöhte Risiko, insbesondere bei Epilepsiepatienten, Anfälle auszulösen. Zusätzlich kommt es häufiger zu kurzfristigen fazialen Kontraktionen, die die Sprachleistung beeinträchtigen und den Untersucher zu falschen Rückschlüssen verleiten können (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998).

2.5.3. Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Bei der PET werden der Versuchsperson radioaktiv markierte natürlich vorkommende Substanzen (Glukose, Sauerstoff etc.) in die Blutbahnen injiziert, die im untersuchten Organ unter Freisetzung eines Positrons zerfallen (Büchel & Weiller, 2002). Die Verteilung der freigesetzten Positronen kann mit Hilfe computertomographischer Rekonstruktionsverfahren in bildliche Darstellungen umgewandelt werden. So kann in Verbindung mit Leistungstests eine erhöhte Nervenzellenaktivität in den dafür relevanten Regionen nachgewiesen werden (Kaplan et al., 1999; Liotti, Gay, & Fox, 1994). Nachteilig wirkt sich die Invasivität durch radioaktive Belastung aus, was auch Wiederholungsmessungen problematisch macht.

2.6. Funktionelle Hemisphärenasymmetrie bei Sprachprozessen

2.6.1. Sprachbezogene Verarbeitung

Im folgenden Abschnitt wird das Konzept der sprachlichen Hemisphärendominanz (SHD) erläutert. Zum genaueren Verständnis der sprachbezogenen Verarbeitungsprozesse werden anschließend die Komponenten des Sprachsystems sowie deren Lokalisation im menschlichen Gehirn beschrieben. Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Studie werden schließlich der bisherige Forschungsstand und die verwendeten methodischen Ansätze zur Erfassung der Lateralisation von Sprachprozessen dargestellt.

2.6.1.1. Konzept der sprachlichen Hemisphärendominanz (SHD)

Im Jahre 1836 bemerkte der Mediziner Marc Dax, dass alle Patienten mit Sprachfunktionsstörungen, die er in seiner Laufbahn untersucht hatte, wegen linksseitiger Hirnschädigungen (meist nach Schlaganfällen) zur Behandlung gekommen waren. Paul Broca berichtete im Jahre 1864, ohne Kenntnis der Arbeiten von Dax, über neun Autopsien an aphasischen Patienten, die ausschließlich linkshemisphärische

Läsionen vorwies. Diese Erkenntnisse ergaben die ersten Hinweise auf eine funktionelle Asymmetrie der Großhirnhemisphären, bei der die linke Hemisphäre als die sprachdominante (die verbale) und die rechte Hemisphäre als nichtsprachdominante (nonverbale) bezeichnet wurde. Heutzutage werden, ergänzend zu Studien an hirngeschädigten Patienten, neben Gesichtsfeldabhängiger Stimulation auch bildgebende Techniken (fMRT, PET, fTCD; siehe Abschnitte 2.4. und 2.5.) bei Gesunden zur weiteren Erforschung der funktionellen Hemisphärenasymmetrie eingesetzt. Entscheidend ist hierbei, dass es sich bei der Hemisphärenspezialisierung um eine Dominanz einer Hemisphäre handelt und nicht, wie teilweise angenommen, um eine kategorielle, klar verteilte Zuordnung. Man geht heute eher von einer unterschiedlich ausgeprägten Beteiligung beider Hemisphären an perzeptiven und kognitiven Prozessen aus (Hartje, 2002).

2.6.1.2. Komponenten des Sprachsystems

Sprache untergliedert sich in die Komponenten Phonologie (lautliche Struktur von Sätzen oder Wörtern), Lexikon (Wissen über Wörter), Syntax (Wortstellung im Satz) und Semantik (Bedeutung von Wörtern und Sätzen). Außerdem werden die Sprachleistungen zusätzlich in expressive (Schreiben und Sprechen) und rezeptive (Lesen und Verstehen) Modalitäten untergliedert. Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die expressiven Sprachleistungen und Sprachareale von Bedeutung und sollen daher im Folgenden genauer betrachtet werden.

2.6.1.3. Lokalisation der expressiven Sprachareale

Obwohl in der Literatur häufig von klar umschriebenen Sprachregionen (insbesondere Wernicke- und Broca-Areal) die Rede ist, wird diese Ansicht in großen Teilen der Wissenschaft heutzutage nicht mehr vertreten (Binder, 1997). Nach neueren Forschungserkenntnissen ist danach eher von einer diffuseren Repräsentation der Sprache und der daran beteiligten Prozesse auszugehen. Untersuchungen expressiver Sprachprozesse mittels bildgebender Verfahren fanden dabei wiederholt Aktivierungen in frontalen Arealen, insbesondere im linkshemisphärischen, inferioren Teil des Frontallappens (Fuß der dritten Stirnhirnwindung, BA 44/45 und 47). Bei genauerer Betrachtung untergliedert sich dieser inferiore Teil des Frontallappens (inferior frontal gyrus; IFG) in drei Teile: Den opercularen Kortex (BA 44), den triangulären Kortex (BA

45) sowie den orbitalen Kortex (BA 47). Zytoarchitektonisch wird der operculare Kortex rostral begrenzt durch den triangulären Kortex, der wiederum ventral mit dem orbitalen Kortex verbunden ist (siehe Abbildung 15). Opercularer und triangulärer Kortex grenzen wiederum in der Tiefe des Sulcus lateralis an die Insula, einer weiteren sprachassoziierten und eher mesial liegenden Region. Eine weitere Region, die häufig in bildgebenden Studien mit expressiven Sprachprozessen in Verbindung gebracht wird, ist der mittlere Frontalkortex (middle frontal gyrus; MFG (BA 46). Er nimmt dabei ungefähr das mittlere Drittel der zweiten Stirnhirnwindung ein und ist der am weitesten anterior gelegene Teil des inferioren Frontalkortex (siehe Abbildung 15). Direkt rostro-ventral zu dieser Region liegt die fronto-polare Region (BA 10), die den größten Teil des vorderen superioren und mittleren Frontalkortex (1. und 2. Stirnhirnwindung) einnimmt. Ventral zur fronto-polaren Region befindet sich der präfrontale Kortex (BA 11), der wiederum dorsal durch den orbitalen Kortex (BA 47) begrenzt wird. Um Missverständnisse zu vermeiden, sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass es sich bei den genannten Regionen um die ursprünglichen Bezeichnungen der Brodmann-Areale und deren Lokalisationen handelt. Nach heutiger Sicht umfasst der präfrontale Kortex ein größeres Gebiet, welches neben der BA 11 auch weite Teile des SFG, MFG, IFG sowie der BA 10 einschließt.

Weitere, aber für Sprachprozesse weniger relevante frontale Regionen, sind die granulär-frontale Region (BA 9), die intermedial-frontale Kortexregion (BA 8) und die agranulär-frontale Kortexregion (BA 6), die sich größtenteils in den hinteren, posterioren Regionen der superioren und mittleren Stirnhirnwindung befinden. Räumlich getrennt wird die erste Stirnhirnwindung (superior frontal gyrus; SFG) von der zweiten Stirnhirnwindung (MFG) durch den superior-frontalen Sulcus (SFS). Der MFG wird vom IFG durch den inferior-frontalen Sulcus (IFS) getrennt.

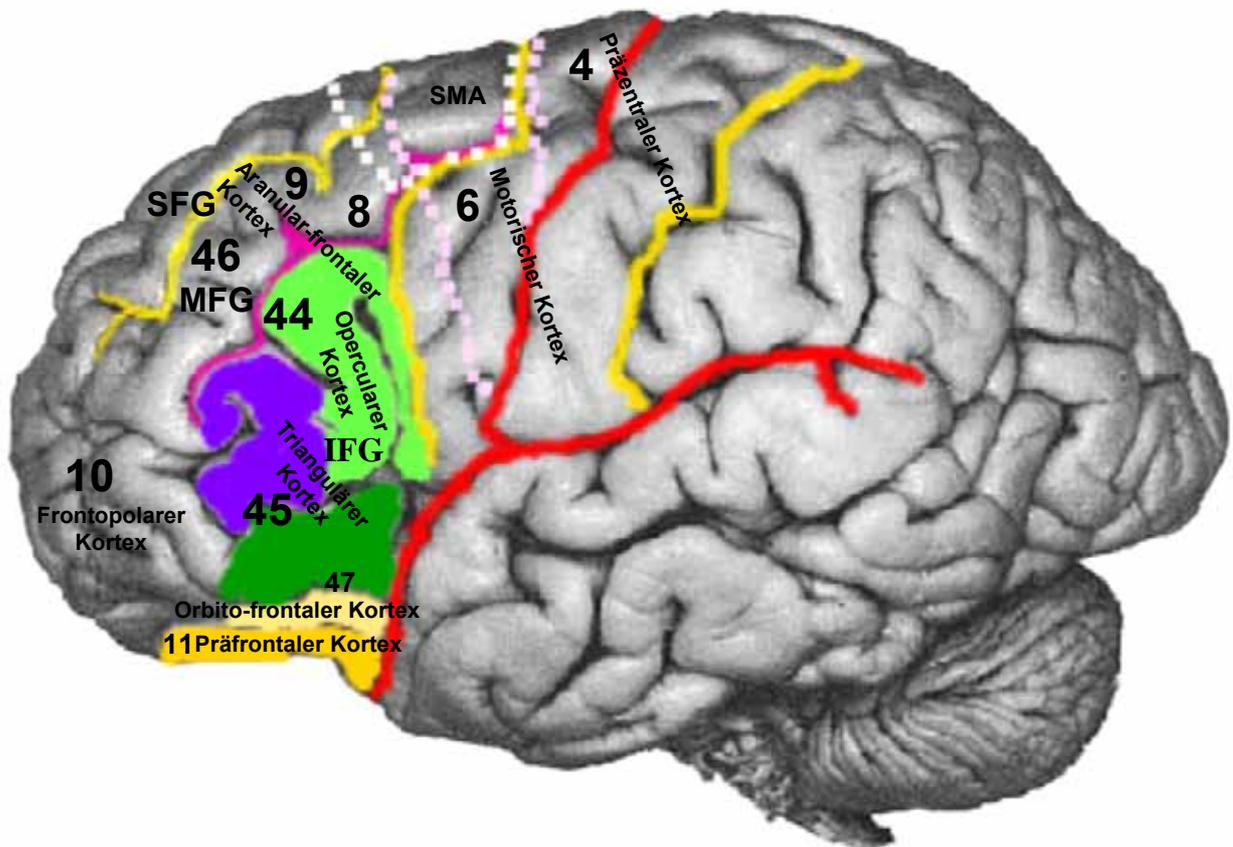


Abbildung 15: Der (prä-)frontale Kortex (inferior-frontaler Kortex farblich markiert)

2.6.1.4. Methoden zur Lokalisation der Sprachareale

In der aktuellen Forschung (untersucht mittels fMRT, PET, fTCD o. ä.) wird zwischen mehreren Aufgabentypen unterschieden, die zur Aktivierung oder Auslösung expressiver Sprachprozesse eingesetzt werden können: Am häufigsten verwendet werden dabei lexikalische, semantische oder phonologische Aufgaben:

2.6.1.4.1. Lexikalische Aufgaben

Lexikalische Aufgaben betreffen das allgemeine Wissen über Wörter und über Zusammenhänge von Wörtern. In wissenschaftlichen Studien eingesetzte Aufgaben, mit denen speziell das lexikalische Sprachsystem aktiviert werden sollte, waren u. a. Wortgenerierung, Wortstammerngänzung, Wortkettentests oder Wortentscheidung. Die *Wortgenerierung* („verbal fluency“) ist dabei das bekannteste und in der Forschung am

häufigsten verwendete Paradigma (Adcock et al., 2003; 1997; Brannen et al., 2001; Brazdil et al., 2005; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Deppe et al., 2000; Frith, Friston, Liddle, & Frackowiak, 1991; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Knecht, Deppe et al., 2000; Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998; Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998; Knecht, Drager et al., 2000; Lurito, Kareken, Lowe, Chen, & Mathews, 2000; Maldjian, Laurienti, Driskill, & Burdette, 2002; McGraw, Mathews, Wang, & Phillips, 2001; Phelps, Hyder, Blamire, & Shulman, 1997; Pujol, Deus, Losilla, & Capdevila, 1999; Pujol et al., 1996; Sabbah et al., 2003; Schlösser et al., 1998; Spreer et al., 2001; van der Kallen et al., 1998; Wood et al., 2004; Wörmann et al., 2003; Yetkin et al., 1995; Yetkin et al., 1998). Hierbei wird den Probanden ein Buchstabe entweder visuell oder auditiv dargeboten, worauf sie anschließend in einer vorgegebenen Zeitspanne so viele Wörter wie möglich aktiv generieren sollen, die mit diesem Buchstaben beginnen. Eine mögliche Variation dieser Aufgabe besteht darin, die Wörter mental generieren zu lassen. Bei der *Wortstammerngänzung* werden den Probanden Präfixe präsentiert, die daraufhin so ergänzt werden sollen, dass ein reguläres Wort entsteht (z. B. Präfix: „Ein-“; Ergänzung: „-ladung“) (Palmer et al., 2001). Bei *Wortkettentests* besteht die Aufgabe darin, den letzten Buchstaben eines generierten Wortes als Startbuchstaben für die Bildung des nächsten Wortes zu verwenden (z. B. Besenu – Nagel – Lampe etc.) (Deblaere et al., 2004). Eine weitere häufig verwendete lexikalische Aufgabe ist die *Wortentscheidung*. Hierbei müssen die Probanden meist zwischen regulären Wörtern der deutschen Sprache und frei erfundenen Pseudowörtern unterscheiden (Hunter et al., 1999; Li, Jin, & Tan, 2004).

2.6.1.4.2. Semantische Aufgaben

Bei semantischen Aufgaben steht dagegen die Bedeutung der Wörter oder Sätze im Vordergrund. Beispiele für Aufgaben, die eine semantische Verarbeitung der Wörter oder Sätze auslösen sollen, sind u. a. semantische Generierungs- oder Entscheidungsaufgaben, semantische Synonym- oder Antonymbewertung bzw. Generierung und semantisches Wortergänzen. Beim *semantischen Generieren* werden Kategorien vorgegeben und die Versuchspersonen aufgefordert, so viele passende Mitglieder dieser Kategorie zu nennen wie möglich (z. B. Kategorie: „Obst“ → Mitglieder der Kategorie Obst: „Banane“, „Apfel“, „Pflaume“ etc.) (Brannen et al., 2001; Calabrese, 2001; Crosson et al., 2003; Crosson et al., 1999; Crosson et al., 2001; Gaillard et al., 2004; Gaillard et al., 2003; Lehericy et al., 2000; Pujol et al., 1996; Rutten, Ramsey, van Rijen,

& van Veelen, 2002; Sabbah et al., 2003; Shaywitz et al., 1995). Bei *semantischen Entscheidungsaufgaben* werden den Probanden beispielsweise Unterbegriffe verschiedener Kategorien präsentiert, und es soll entschieden werden, ob es sich dabei um typische Vertreter dieser Kategorien handelt (Baxter et al., 2003; Billingsley, McAndrews, Crawley, & Mikulis, 2001; Deblaere et al., 2002; Pugh et al., 1996; Rossell, Price, & Nobre, 2003; Seghier et al., 2004). Andere häufig verwendete Varianten der semantischen Entscheidungsaufgabe bestehen zum Beispiel darin, dass zwei Entscheidungen gleichzeitig getroffen („Animals native to the USA or used by humans“) (Binder, 1997; Binder et al., 1997; Binder et al., 1996; Demonet et al., 1992; Frost et al., 1999; Sabsevitz et al., 2003; Szaflarski et al., 2002) oder vorgegebene Wörter anhand eines Kriteriums bewertet werden müssen (z. B. „living“-„nonliving“ oder „abstraktes Wort“-„konkretes Wort“) (Calvert et al., 2000; Demb et al., 1995; Desmond et al., 1995; Gabrieli et al., 1996; Kapur et al., 1994; Mo, Liu, Jin, & Yang, 2005; Poldrack et al., 1999). Eine weitere Möglichkeit semantisches Verarbeiten von Wörtern auszulösen, besteht darin, den Probanden Wörter zu präsentieren, zu denen ein passendes Antonym oder Synonym gefunden werden soll (z. B. Antonym von „hell“ → „dunkel“ oder Synonym von „Haus“ → „Gebäude“) (Klein, Milner, Zatorre, Meyer, & Evans, 1995). Bei der *semantischen Synonym- oder Antonymbewertung* soll, im Gegensatz zum selbstständigen Generieren von Synonymen oder Antonymen, nur entschieden werden, ob es sich bei zwei vorgegebenen Wörtern um korrekte Synonyme bzw. Antonyme handelt (Fernández et al., 2001; Fernández et al., 2003). Eine in der aktuellen Forschung eher selten verwendete Aufgabe ist das *semantische Wortergänzen*. Hierbei werden den Probanden einzelne Wörter präsentiert, auf die damit zusammenhängende typische Tätigkeiten generiert werden sollen (z. B. „Fußball“ → „spielen“) (Brown et al., 2005; Holland et al., 2001).

2.6.1.4.3. Phonologische Aufgaben

Aufgaben, die eine phonologische Bearbeitung erfordern und damit speziell die damit verbundenen Hirnregionen aktivieren sollen, sind Reimentscheidungs- oder Reimgenerierungsaufgaben, Pseudowortlesen, Silbenzählen (bei Wörtern oder Pseudowörtern) oder Pseudohomophonaufgaben. Bei dieser Art von Aufgaben steht vor allem die lautliche Struktur von Sätzen oder Wörtern im Mittelpunkt. In der Wissenschaft vielfach eingesetzt wurden *Reimentscheidungsaufgaben* (Baciu et al., 2001; Billingsley et al., 2001; Coney, 2002; Lurito et al., 2000; Poldrack et al., 2001; Pugh et al., 1996;

Seghier et al., 2004; Xu et al., 2001). Hierbei müssen die Probanden bei zwei zeitgleich oder aufeinanderfolgend präsentierten Wörtern bewerten, ob ein Reim vorliegt oder nicht. Variiert werden kann diese Aufgabe zum Beispiel dadurch, dass es sich bei den beiden präsentierten Wörtern um frei erfundene Pseudowörter handelt. Dies hätte den Vorteil, dass keine lexikalische Repräsentanz vorhanden wäre (Billingsley et al., 2001; Coney, 2002; Poldrack et al., 2001; Xu et al., 2001). Entscheidend für diese Art von Aufgaben ist es zudem, dass die präsentierten Wörter unterschiedliche Grapheme besitzen und so die Aufgabe nicht über einen rein orthographischen Abgleich gelöst werden kann (z. B. unterschiedliche Grapheme: „Hain“ und „Wein“; gleicher Graphem: „Bein“ und „Nein“). Beim *Reimgenerieren* werden so genannte Triggerwörter vorgegeben, auf die die Probanden anschließend mehrere sinnvolle Reimwörter finden sollen. In der Forschung wurden bislang allerdings ausnahmslos Reimgenerierungsaufgaben eingesetzt, bei denen die Probanden eine Generierung nur eines Wortes vornehmen mussten (Hören oder Lesen eines regulären Wortes → Antwort mit einem regulären Reimwort; z. B. Rat → Cat) (Bahn et al., 1997; Crosson et al., 2003; Klein et al., 1995). Des Weiteren handelte es sich um reguläre Wörter, die den Probanden vorgegeben wurden und auf die im Anschluss ein passendes Reimwort gesucht werden sollte. Kognitiv weniger anspruchsvolle phonologische Aufgaben wären u. a. die *Non-senssilbengenerierung* oder das *Zählen von Silben* in Wörtern oder Pseudowörtern (Crosson et al., 2003; Demonet et al., 1992; Poldrack et al., 1999). Eine weitere Gruppe von phonologischen Aufgaben sind *Pseudohomophonaufgaben* (Calvert et al., 2000; Kuo et al., 2004; Rumsey et al., 1997; Siok, Jin, Fletcher, & Tan, 2003). Hierbei besteht die Aufgabe der Probanden beispielsweise darin zu entscheiden, ob ein visuell präsentiertes Pseudowort einem regulären Wort des Sprachgebrauchs ähnlich klingt (z. B. Pseudowort „Vain“; reguläres und ähnlich klingendes Wort: „Fein“).

2.6.1.4.4. Weitere Paradigmen

Neben Aufgaben zur lexikalischen, semantischen und phonologischen Verarbeitung werden auch eine Reihe weiterer Sprachaufgaben, mit dem Ziel die sprachrelevanten Areale bestmöglich zu aktivieren, eingesetzt. Verwendete Aufgaben waren hierbei *syntaktische Entscheidung bzw. Generierung* (Haller, Radue, Erb, Grodd, & Kircher, 2005; Kang, Constable, Gore, & Avrutin, 1999), *Buchstabengenerierung* (de Zubicaray et al., 1998) oder das einfache *Lesen von Pseudowörtern* (Hagoort et al., 1999; Herbster, Mintun, Nebes, & Becker, 1997; Kuo et al., 2004; Mechelli et al., 2000;

Mechelli, Gorno-Tempini, & Price, 2003; Price, Wise, & Frackowiak, 1996). Bei der syntaktischen Entscheidung bzw. Generierung sollten entweder „Verb-Substantiv“-Paare nach syntaktischer Korrektheit bewertet oder aus drei vorgegebenen Wörtern ein sinnvoller Satz gebildet werden. De Zubicaray und Mitarbeiter (1998) ließen die Probanden bei ihrer Aufgabe Buchstaben nach verschiedenen vorgegebenen Regeln und mit wechselnden Startbuchstaben generieren.

2.6.1.5. Aktivierungen sprachrelevanter Areale in bisherigen Studien

Im folgenden Abschnitt werden die Aktivierungsbefunde in den sprachassoziierten Regionen bei lexikalischen, semantischen und phonologischen Aufgaben dargestellt. Auswahlkriterium für die Studien (in Fachzeitschriften) war die Dokumentation der beteiligten Areale in Form von Koordinatenwerten (x-, y- und z-Koordinaten).

2.6.1.5.1. Aktivierungen bei lexikalischen Aufgaben

Betrachtet man die Aktivierungen, die bei Studien mit funktioneller Bildgebung (fMRT oder PET) in Kombination mit lexikalischer Wortgenerierung bei gesunden Probanden gefunden wurden, zeigt sich, dass bei der Mehrheit der linke inferiore Frontallappen (IFG, BA 44/45 und 47) die größte Rolle spielt (Adcock et al., 2003; Brazdil et al., 2005; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Frith et al., 1991; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Maldjian et al., 2002; Palmer et al., 2001; Phelps et al., 1997; Pujol et al., 1996; Schlösser et al., 1998; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1995) (siehe Abbildung 16 und Tabelle 2). Auch bei Studien mit Patienten mit Temporal-lappenepilepsie zeigte sich bei dieser Art von Aufgabe ein ähnliches Bild (Brannen et al., 2001; Brazdil et al., 2005; Sabbah et al., 2003; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1998). Des Weiteren fanden eine Reihe von Studien mit fTCD, Wada-Test oder fMRT eine linkshemisphärisch dominante Aktivierung bei der Bearbeitung lexikalischer Wortgenerierungsaufgaben, unabhängig davon, ob es sich bei der untersuchten Gruppe um klinische Probanden oder gesunde Kontrollprobanden handelte (Deppe et al., 2000; Lurito et al., 2000; Pujol et al., 1999; Wood et al., 2004; Wörmann et al., 2003).

Tabelle 2: Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Generierung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Brazdil et al. (2005) lexikalische Wortgenerierung (Patientengruppe)			-30 21 -3 -45 12 -3					
Brazdil et al. (2005) lexikalische Wortgenerierung (Kontrollgruppe)			-39 18 -6				(BA 6) -24 0 63	
Adcock et al. (2003) lexikalische Wortgenerierung	-56 10 24*	-54 30 8	-46 18 -6	-42 28 16		-2 12 46 -34 0 42		Insula -32 22 4
Maldjian et al. (2002) lexikalische Wortgenerierung								(BA 32) -4 14 50
Fu et al. (2002) lexikalische Wortgenerierung (schwere Buchstaben)		-48 20 8	-49 22 -4	-33 22 24	-37 20 35		(BA 10) -29 54 24	
Fu et al. (2002) lexikalische Wortgenerierung (leichte Buchstaben)	-51 3 20			-38 44 16	-33 41 32		(BA 9) -2 47 32	
Palmer et al. (2001) lexikalische Generierung (Wortstammergänzung)		-31 19 4				-45 3 18		
Schlosser et al. (1998) lexikalische Wortgenerierung (weibliche Vpn)	-48 8 26 -48 14 20	-52 30 12						
Schlosser et al. (1998) lexikalische Wortgenerierung (männliche Vpn)	-48 14 26	-46 28 20					(BA 6) -6 18 50	
Frith et al. (1991) lexikalische Wortgenerierung		-43 29 20						

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

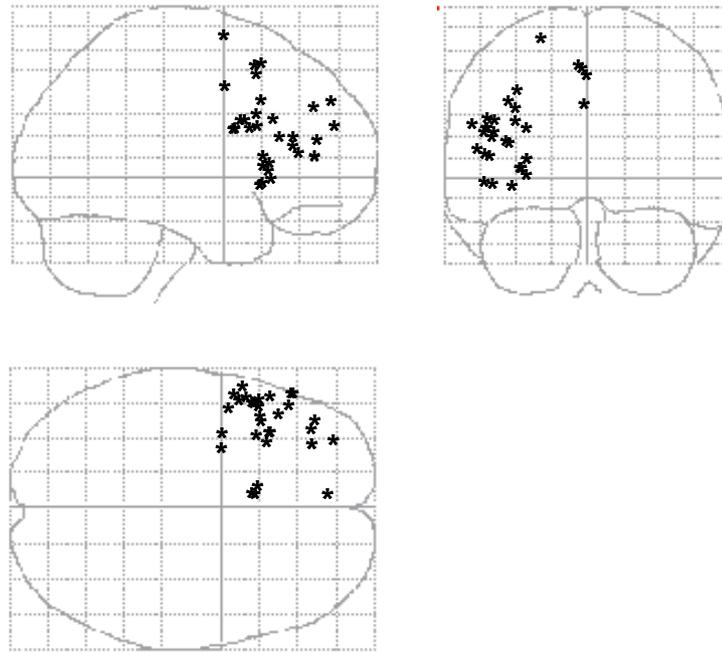


Abbildung 16: Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Generierung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 2)

Eine ähnlich starke Aktivierung bei der lexikalischen Wortgenerierung fand sich im mittleren Frontalkortex bzw. im dorsolateralen Präfrontalkortex (MFG/DLPFC; BA 46) (Adcock et al., 2003; Brannen et al., 2001; Brazdil et al., 2005; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Pujol et al., 1996; Sabbah et al., 2003; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1995) (siehe Abbildung 16 und Tabelle 2).

Aktivierungen des granulär-frontalen Kortex (BA 9) zeigten sich dagegen nur vereinzelt (Brannen et al., 2001; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000) (siehe Abbildung 16 und Tabelle 2). Bei einer Untersuchung von Epilepsiepatienten mit der Wortkettenaufgabe zeigte sich eine ähnliche Aktivierung (IFG und BA 9) wie bei der Wortgenerierungsaufgabe (Deblaere et al., 2004). Das in zwei Studien eingesetzte Verfahren der Wortstammerngänzung lieferte Aktivierungen in unterschiedlichen Regionen (Gabrieli, Poldrack, & Desmond, 1998; Palmer et al., 2001). Bei Palmer und Kollegen zeigte sich eine eher bilaterale Aktivierung des IFG bei der Untersuchung gesunder Kontrollpatienten mit der Wortstammerngänzung.

Tabelle 3: Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Li et al. (2004) lexikalische Entscheidung (bei Verben)				-50 32 11				Insula -38 15 -2
Li et al. (2004) lexikalische Entscheidung (bei Hauptwörtern)	-50 11 20*	-48 28 12						
Kiehl et al. (1999) lexikalische Entscheidung (Konkret vs. Ruhe)	-49 8 32						(BA 6) -34 0 60	
Kiehl et al. (1999) lexikalische Entscheidung (Abstrakt vs. Ruhe)	-49 8 32						(BA 6) -34 0 56	

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

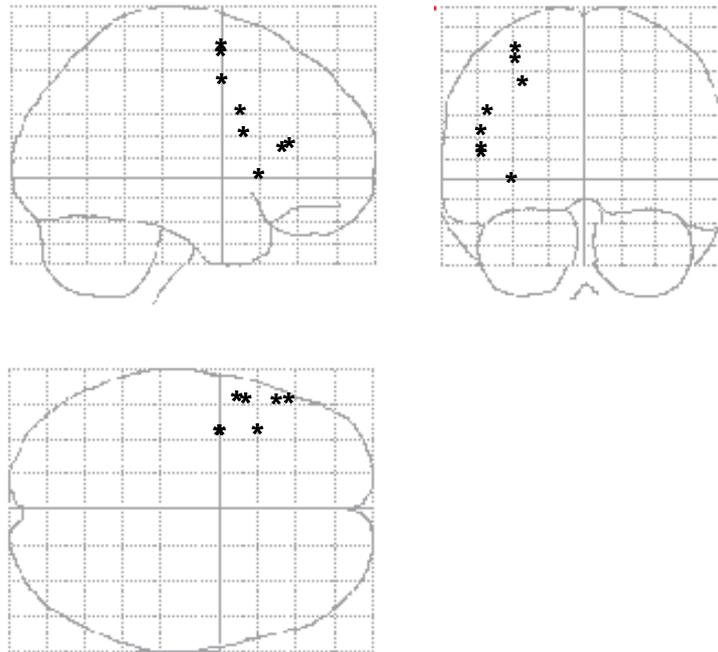


Abbildung 17: Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 3)

Bei Gabrieli und Kollegen war die Aktivierung dagegen linkshemisphärisch und lag im MFG (BA 46). In Studien zu lexikalischer Entscheidung wurden hauptsächlich linkshemisphärische Aktivierungen im IFG und im Bereich der Insula gefunden (Kiehl et al., 1999; Li et al., 2004) (siehe Abbildung 17 und Tabelle 3). Unabhängig von der Wahl der lexikalischen Untersuchungsmethode wurden bei einem Großteil der Studien, zusätzlich zu den Aktivierungen im IFG und MFG, Aktivierungen im anterioren Gyrus Cinguli gefunden (Adcock et al., 2003; Brazdil et al., 2005; Deblaere et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Maldjian et al., 2002; Phelps et al., 1997; Pujol et al., 1996; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1995; Yetkin et al., 1998). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass lexikalische Aufgaben und insbesondere die Wortgenerierung, sehr gut geeignete Methoden sind, um Aktivierungen im anterioren Sprachzentrum und in damit verbundenen Regionen zu evozieren.

2.6.1.5.2. Aktivierungen bei semantischen Aufgaben

Unabhängig von der Variante der semantischen Entscheidungsaufgabe fanden sich bei

Tabelle 4: Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Entscheidung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Mo et al. (2005) semantische Entscheidung (nonliving?)	-48 23 3	-44 36 10	-44 -3 51 -40 -6 37 0 1 53					
Mo et al. (2005) semantische Entscheidung (living?)		-43 36 14	-45 16 28					
Seghier et al. (2004) semantische Entscheidung	-46 19 11 -44 14 32 -45 29 22							
Rossell et al. (2003) semantische Entscheidung	-48 4 32*	-52 16 0						
Fernández et al. (2001) semantische Entscheidung (Synonyme)		-49 27 -7					(BA 9/10) -7 59 16	
Kang et al. (1999) semantische Entscheidung	-55 10 24							
Poldrack et al. (1999) semantische Entscheidung vs. phonologische Entscheidung	-53 16 25						(BA 9) -7 50 31 (BA 8) -4 35 38	
Poldrack et al. (1999) semantische Entscheidung vs. Kontrollaufgabe	-49 8 26	-46 20 -3	-46 50 1				(BA 8) -1 35 47	
Demonet et al. (1992) semantische Entscheidung							(BA 32) -16 28 44	

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

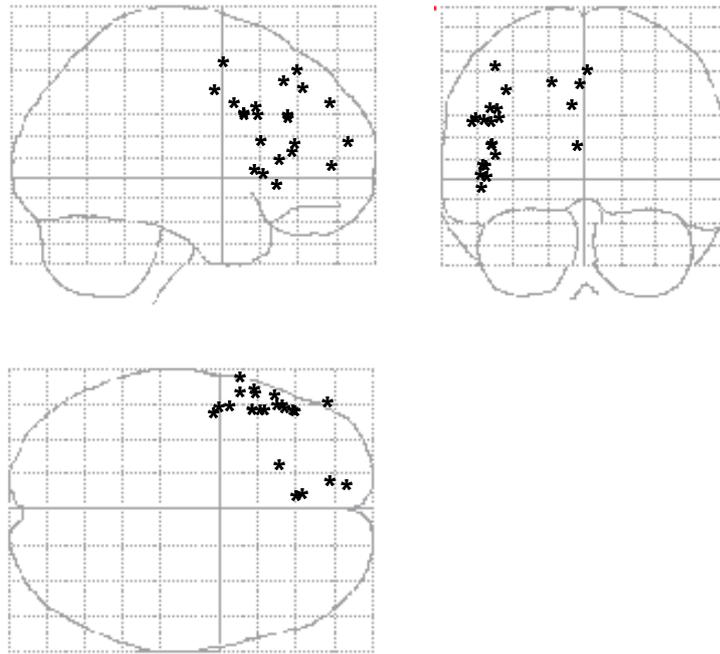


Abbildung 18: Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Entscheidung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 4)

einem Großteil der Bildgebungsstudien an gesunden Probanden Aktivierungen im linken IFG (BA 44/45 und 47) (Baxter et al., 2003; Binder et al., 1997; Calvert et al., 2000; Deblaere et al., 2002; Demb et al., 1995; Demonet et al., 1992; Fernández et al., 2001; Gabrieli et al., 1996; Kang et al., 1999; Mo et al., 2005; Poldrack et al., 1999; Rossell et al., 2003; Seghier et al., 2004; Szaflarski et al., 2002) (siehe Abbildung 18 und Tabelle 4). Bei drei Studien mit TLE-Patienten wurde auch übereinstimmend eine linkshemisphärische Aktivierung im IFG (BA 44/45 und 47) gefunden (Billingsley et al., 2001; Binder et al., 1996; Desmond et al., 1995), in einer Studie war die Aktivierung im IFG im Vergleich mit einer gesunden Kontrollgruppe sogar stärker ausgeprägt (Billingsley et al., 2001). Aktivierungen im MFG (BA 46) zeigten sich eher selten, dafür aber sowohl in Studien mit Gesunden (Demb et al., 1995; Gabrieli et al., 1996; Kapur et al., 1994; Mo et al., 2005; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004; Szaflarski et al., 2002) als auch in Studien mit TLE-Patienten (Billingsley et al., 2001; Binder et al., 1996; Desmond et al., 1995). Im Vergleich zu anderen sprachlichen Aufgaben stehen bei der

Tabelle 5: Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Generierung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Crosson et al. (2003) semantische Generierung (schwer)	-51 12 23* -46 23 30					-32 3 55		
Crosson et al. (2003) semantische Generierung (leicht)	-51 11 24 -52 28 13 -46 23 29	-52 28 13				-27 4 62 -39 1 42		
Crosson et al. (2003) semantische Generierung			-37 25 4			-46 0 38		
Gaillard et al. (2003) semantische Generierung (Kinder)			-56 14 -6	-44 10 34			(BA 6/8) -2 14 52 (BA 10) -12 56 -8	
Gaillard et al. (2003) semantische Generierung (Erwachsene)			-48 22 -6	-52 10 34			(BA 6) -28 12 60 (BA 6/8) -2 18 52	
Crosson et al. (2001) semantische Generierung eines Wortes auf eine Kategorie		-43 19 15					(BA 6/8/9) -38 22 30	
Xiong et al. (1998) semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP6		-23 -21 20						
Xiong et al. (1998) semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP5		-51 17 4 -49 32 4						Insula -37 -17 4
Xiong et al. (1998) semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP4		-40 -33 4						
Xiong et al. (1998) semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP3	-58 -5 24			-40 -37 24				

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Xiong et al. (1998) <i>semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP2</i>		-37 -27 -16 -23 -21 -16						
Xiong et al. (1998) <i>semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort): VP1</i>	-50 8 18	-47 -18 18						
Klein et al. (1995) <i>semantische Generierung von Synonymen (hören eines Wortes --> Antwort mit einem Wort)</i>		-44 34 15	-42 39 -6	-48 22 26			(BA 8) -3 18 54	
Shaywitz et al. (1995) <i>semantische Generierung</i>							(BA 10) -20 65 8	Insula -35 15 8
Petersen et al. (1998) <i>semantische Generierung (eines Verbs auf ein Hauptwort)</i>		-38 36 8 -44 36 20						(BA 11) -28 50 -6

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

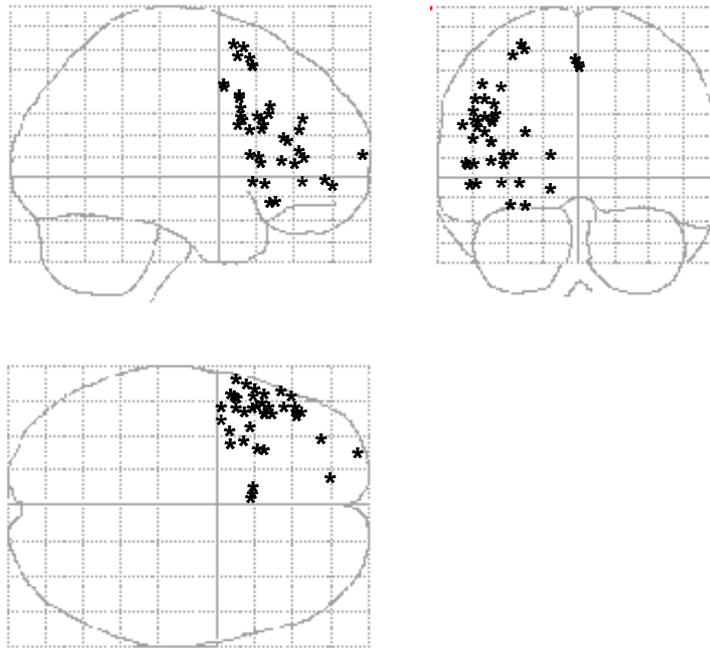


Abbildung 19: Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Generierung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 5)

semantischen Entscheidung auch des Öfteren Aktivierungen des linken superioren Frontallappens (SFG, BA 8/9 und 10) im Vordergrund (Binder, 1997; Demb et al., 1995; Demonet et al., 1992; Fernández et al., 2001; Gabrieli et al., 1996; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004; Szaflarski et al., 2002) (siehe Abbildung 18 und Tabelle 4). Dieser Befund bestätigte sich auch bei Untersuchungen an TLE-Patienten (Billingsley et al., 2001; Binder et al., 1996; Desmond et al., 1995; Fernández et al., 2001). Auch in einer Studie zu semantischer Synonymbewertung waren die gleichen Regionen (BA 44/45 und 47 sowie BA 9/10) aktiviert (Fernández et al., 2001). In einer Reihe von Untersuchungen, die anstatt konkreter Aktivierungen den Lateralitätsindex als Maß angaben, bestätigte sich größtenteils, dass die linke Hemisphäre bei semantischen Entscheidungsaufgaben stärker als die rechte aktiviert wurde (Fernández et al., 2003; Kennan, Kim, Maki, Koizumi, & Constable, 2002; Pugh et al., 1996; Sabsevitz et al., 2003).

Betrachtet man semantische Aufgaben, bei denen die Komponente der Generierung hinzukommt, zeigt sich, dass zwar ähnliche Regionen aktiviert sind, allerdings in noch stärkerem Ausmaß als bei Entscheidungsaufgaben (Brannen et al., 2001; Crosson et al., 2003; Crosson et al., 2001; Gaillard et al., 2003; Holland et al., 2001; Klein et al., 1995; Lehericy et al., 2000; McCarthy, Blamire, Rothman, Gruetter, & Shulman, 1993;

Petersen, Fox, Posner, Mintun, & Raichle, 1988; Pujol et al., 1996; Sabbah et al., 2003; Shaywitz et al., 1995; Xiong et al., 1998) (siehe Abbildung 19 und Tabelle 5). Relativ häufig im Vergleich zu semantischen Entscheidungsaufgaben wurden Aktivierungen im MFG/DLPFC (Brannen et al., 2001; Gaillard et al., 2003; Holland et al., 2001; Klein et al., 1995; Lehericy et al., 2000; Pujol et al., 1996; Sabbah et al., 2003; Xiong et al., 1998) und im Gyrus Cinguli (Crosson et al., 1999; Holland et al., 2001; Lehericy et al., 2000; Xiong et al., 1998) gefunden, was auf eine stärkere Beteiligung dieser Areale bei Generierungsprozessen hindeutet. Da auch Aktivierungen im SFG (BA 6/8/9/10) sowie im Bereich der Insula in mehreren Studien gefunden wurden (Crosson et al., 2003; Crosson et al., 2001; Gaillard et al., 2003; Klein et al., 1995; Petersen et al., 1988; Sabbah et al., 2003; Shaywitz et al., 1995; Xiong et al., 1998) (siehe Abbildung 19 und Tabelle 5), kann zusammenfassend festgestellt werden, dass weite Areale des frontalen Kortex bei semantischer Generierung beteiligt sind.

2.6.1.5.3. Aktivierungen bei phonologischen Aufgaben

In Studien zur phonologischen Verarbeitung von Stimuli, in denen verschiedene Varianten der Reimentscheidung eingesetzt wurden, fanden sich fast ausnahmslos Aktivierungen im IFG (BA 44/45 und 47) (Baciu et al., 2001; Booth et al., 2004; Calvert et al., 2000; Kuo et al., 2004; Poldrack et al., 2001; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004; Siok et al., 2003; Xu et al., 2001) (siehe Abbildung 20 und Tabelle 6). In einigen Studien gab es zusätzlich noch deutliche Aktivierungen im MFG/DLPFC (Baciu et al., 2001; Burton, Small, & Blumstein, 2000; Kuo et al., 2004; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004) (siehe Abbildung 20 und Tabelle 6). Andere Varianten phonologischer Verarbeitung (Silben zählen, Klangunterscheidung, Aussprache von Pseudowörtern) aktivierten ebenfalls einheitlich den IFG der linken Hemisphäre (Burton et al., 2000; Demonet et al., 1992; Poldrack et al., 2001; Rumsey et al., 1997), dafür allerdings den MFG deutlich seltener (Burton et al., 2000). Drei Arbeitsgruppen verwendeten eine Art von Reimgenerierung (Hören oder Lesen eines regulären Wortes → Antwort mit einem regulären Reimwort; z. B. Rat → Cat; s. o.) zur Aktivierung phonologischer Areale und konnten zeigen, dass IFG/SFG (Klein et al., 1995) sowie eher posterior-frontal gelegene Areale (BA 46/6) der linken Hemisphäre (Bahn et al., 1997; Crosson et al., 2003) bei der Bearbeitung der Aufgabe beteiligt waren (siehe Abbildung 21 und Tabelle 7). In einer Vergleichsstudie zwischen lexikalischer Generierung und phonologischer Ent-

Tabelle 6: Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Entscheidung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Booth et al. (2004) phonologische (Reim)- entscheidung (Kinder)		-51 30 9				-51 -3 42		
Booth et al. (2004) phonologische (Reim)- entscheidung (Erwachsene)		-48 33 6			(BA 6/8) -6 33 42			
Kuo et al. (2004) phonologische Entscheidung		-46 18 18		-50 24 26	-44 10 34		(BA 6) -4 14 52	Insula -42 6 18
Seghier et al. (2004) phonologische (Reim)- entscheidung	-47 15 16* -45 12 33	-47 15 16	-47 15 16	(BA 46/9) -44 31 27	(BA 46/9) -44 31 27		-26 44 32	
Siok et al. (2003) phonologische Entscheidung					-51 15 34	-32 7 59	(BA 8) -2 22 54	
Poldrack et al. (2001) phonologische (Reim)- entscheidung (Reimen sich Pseudowörter)	-38 12 20	-54 18 8						
Xu et al. (2001) phonologische (Reim)- entscheidung (Reimen sich Wörter)	-42 4 30							
Xu et al. (2001) phonologische (Reim)- entscheidung (Reimen sich Wörter mit unterschiedlichen Schrifttypen)	-42 4 30							
Xu et al. (2001) phonologische (Reim)- entscheidung (Reimen sich Pseudowörter)	-44 4 28 -42 4 30							
Burton et al. (2000) phonologische Entscheidung				-47 15 29 -47 37 19				
Poldrack et al. (1999) phonologische Entscheidung vs. semantische Entscheidung				(BA 9/46) -42 35 26				

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
<i>Poldrack et al. (1999)</i> <i>phonologische Entscheidung vs. Kontrollaufgabe</i>		-47 28 16						
<i>Poldrack et al. (1999)</i> <i>phonologische Entscheidung (bei Pseudowörtern) vs. Kontrollaufgabe</i>	-56 8 23							
<i>Rumsey et al. (1997)</i> <i>phonologische Entscheidung</i>	-42 6 20 -40 10 20	-36 32 8						Insula -32 16 4
<i>Demonet et al. (1992)</i> <i>phonologische Entscheidung</i>	-50 18 20							

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

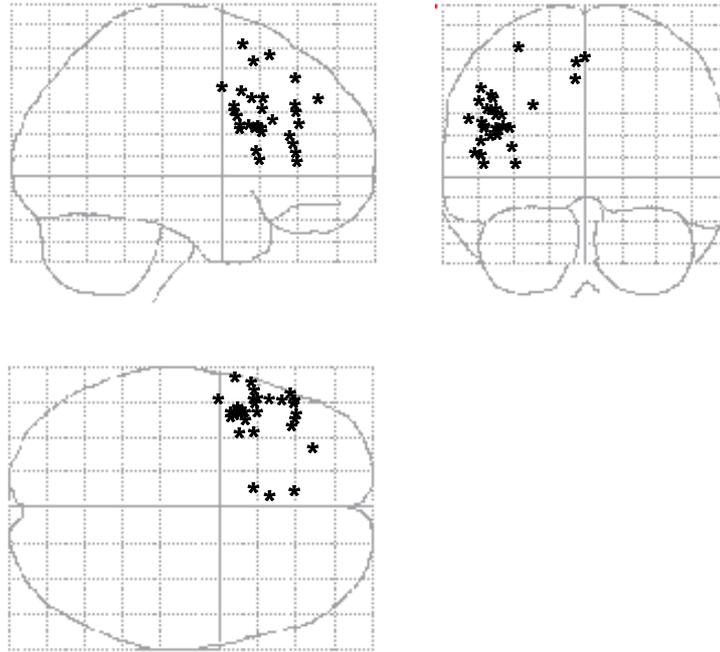


Abbildung 20: Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Entscheidung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 6)

scheidung von Lurito und Kollegen fand sich eine Überlegenheit der Reimentscheidungsaufgabe bei der Lokalisation der sprachdominanten Hemisphäre (Lurito et al., 2000). Auch in einer Studie von Bahn und Kollegen fand sich eine stärkere Aktivierung im Zusammenhang mit der Reimaufgabe als bei der Kontrollbedingung „Wortgenerierung“. Zusätzlich zum erhöhten Blutfluss war die Hemisphärenasymmetrie zu Gunsten der linken und vermutlich sprachdominanten Hemisphäre bei der Reimaufgabe stärker ausgeprägt (Bahn et al., 1997). Neben Bahn und Kollegen vermuten u. a. auch Pujol und Mitarbeiter sowie Fiez und Mitarbeiter aufgrund ihrer Studien insbesondere im posterioren Bereich des IFG/MFG (BA 44/45/8/9) eine Region, die speziell bei der Generierung von Tonsequenzen („sound sequences“ bzw. „phonological processes“) beteiligt ist (Fiez, 1997; Pujol et al., 1996). Nach McGraw und Kollegen eignen sich Reimaufgaben in exzellenter Weise dazu, sprachrelevante Areale zu lokalisieren (McGraw et al., 2001).

Tabelle 7: Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Generierung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Crosson et al. (2003) phonologische Generierung (Reime) (rat -> cat, bat)							(BA 6) -23 -1 56 -46 2 29	
Klein et al. (1995) phonologische Generierung (Reime) (rat -> cat, bat)			-40 36 -3*				(BA 8) -44 15 30	
Shaywitz et al. (1995) phonologische Generierung								Insula -31 10 0

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

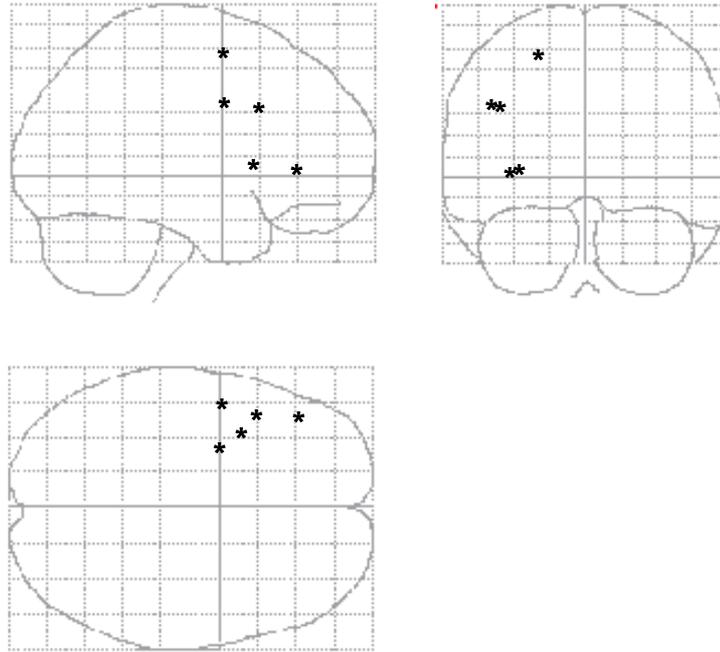


Abbildung 21: Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Generierung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 7)

2.6.1.5.4. Aktivierungen bei Aufgaben ohne lexikalische, semantische oder phonologische Verarbeitung

Da die restlichen verwendeten Aufgaben (Buchstabengenerierung, Wort- und Pseudowortlesen sowie syntaktische Entscheidung bzw. Generierung) von sehr unterschiedlicher Art sind, ist es schwierig, über Zusammenhänge oder Überschneidungen zwischen den dabei aktivierten Regionen zu berichten. Am auffälligsten erscheint dennoch, dass größtenteils Gebiete des IFG (BA 44/45 und 47) und MFG (BA 46/9) bei der Bearbeitung der verschiedenen Aufgaben beteiligt waren (de Zubicaray et al., 1998; Hagoort et al., 1999; Haller et al., 2005; Kang et al., 1999; Mechelli et al., 2000; Mechelli et al., 2003; Price et al., 1996) (siehe Abbildung 22 und Tabelle 8).

Tabelle 8: Linkshemisphärische Aktivierungen bei Aufgaben ohne lexikalische, semantische oder phonologische Verarbeitung

Aufgabe	IFG (BA 44)	IFG (BA 45)	IFG (BA 47)	MFG (BA 46)	MFG (BA 9)	MFG (BA 6)	SFG (BA 6/8/9/10)	Rest
Haller et al. (2005)		-43 17 11				-57 11 30		
syntaktische Generierung								
Mecheili et al. (2003)	-42 16 32*							
Wort- und Pseudowortlesen vs. Fixation								
Mecheili et al. (2003)	-48 8 22							
Pseudowortlesen vs. Wortlesen vs. Fixation								
Mecheili et al. (2000)	-44 2 28		-40 32 -8					
Pseudowortlesen vs. Wortlesen								
Hagoort et al. (1999)			-36 51 -6	(BA 46/10) -40 41 17	(BA 8/9) -37 15 34			
Wortlesen								
Hagoort et al. (1999)			-30 50 -6	(BA 46/10) -41 51 5			(BA 8/9) -39 25 35	
Pseudowortlesen								
Karg et al. (1999)	-50 15 12	-45 25 4						
syntaktische Entscheidung								
de Zubicaray et al. (1998)	-49 14 4							
Buchstabengenerierung								
Herbster et al. (1997)								(BA 38) -46 0 -4
Wortlesen								
Herbster et al. (1997)								(BA 48) -48 6 0
Pseudowortlesen								
Price et al. (1996)	-38 20 12							
Wortverarbeitung (während feature detection task)		-48 8 32						
Price et al. (1996)								
Pseudowortverarbeitung (während feature detection task)								
		-42 34 24						

*Zahlenwerte entsprechen Aktivierungs-Koordinaten (x-, y- und z-Achse); IFG = inferior-frontaler Kortex; MFG = mittlerer Frontalkortex; SFG = superior-frontaler Kortex; BA = Brodmann Area;

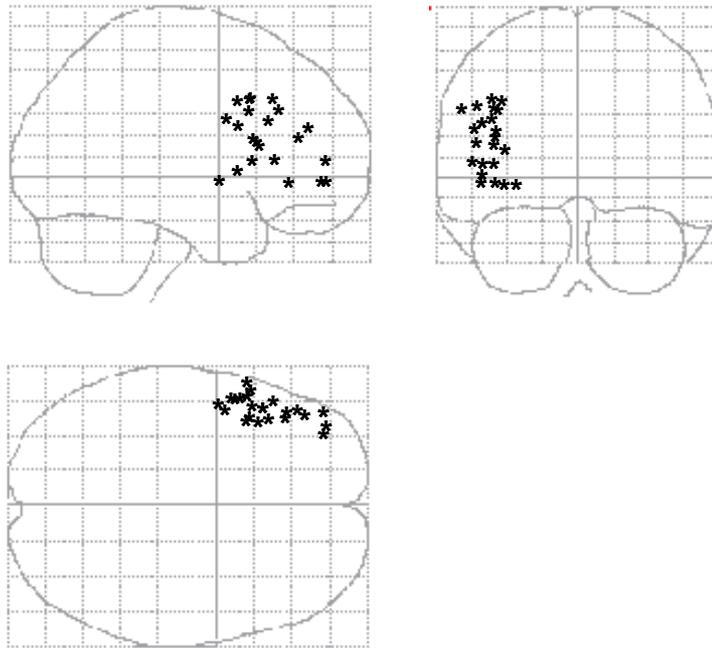


Abbildung 22: Linkshemisphärische Aktivierungen bei Aufgaben ohne lexikalische, semantische oder phonologische Verarbeitung (Sternchen entsprechen den Koordinaten der Tabelle 8)

Aktivierungen des SFG (BA 6/8/9/10) und der Insula stehen dagegen eher im Hintergrund (Hagoort et al., 1999) (siehe Abbildung 22 und Tabelle 8).

2.6.1.5.5. Aktivierungen der rechten Hemisphäre

Unabhängig von der Untersuchungsmethode (fMRT, PET, fTCD) und dem verwendeten Untersuchungsparadigma (lexikalische, semantische oder phonologische Aufgaben) wird nur in wenigen Fällen eine deutlichere Aktivierung der als sprachrelevant erachteten Areale der rechten Hemisphäre beobachtet (Bahn et al., 1997; Kang et al., 1999; Maldjian et al., 2002; Poldrack et al., 1999; Price et al., 1996). Dies bedeutet allerdings nicht, dass keinerlei Aktivierungen in den MFG/inferior-frontalen Arealen der rechten Hemisphäre zu beobachten sind (Adcock et al., 2003; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Fu et al., 2002; Maldjian et al., 2002; Schlösser et al., 1998; Yetkin et al., 1995).

Insbesondere auch bei Patienten mit linksseitiger Temporallappenepilepsie wird häufig über Aktivierungen in diesen Regionen berichtet (Brazdil et al., 2005; Desmond et al., 1995; Spreer et al., 2001). Erklärt wird dies dadurch, dass infolge des linksseitigen

epileptischen Herdes eine Übernahme der Sprachfunktionen von der kontralateral liegenden Hemisphäre stattfindet. Diese sogenannte neuropsychologische und neuronale Plastizität (oder auch morphologische Flexibilität) und die damit verbundene Funktionsübernahme der gesunden Hemisphäre ist vor allem bei Patienten, die schon seit der frühen Kindheit an Epilepsie leiden, zu beobachten (Milner, 1974). Sofern das Gehirn ausreichend Zeit hat, auf schädigende Einflüsse zu reagieren, scheint auch bei Erwachsenen eine Übernahme von Sprachfunktionen durch die rechte Hemisphäre begrenzt möglich zu sein. Bei einem langsam wachsenden Tumor wäre beispielsweise eine kognitive Funktionsübernahme der gesunden Hemisphäre wahrscheinlicher zu erwarten als bei einem plötzlich eintretenden ischämischen Insult (Freund, 1996).

2.6.2. Händigkeit

Der Begriff der Händigkeit ist eine beschreibende Bezeichnung für die funktionelle Asymmetrie im Gebrauch der Hände (Häcker & Stapf, 1998). Ca. 90% der Menschen sind rechtshändig, 5% linkshändig und 5% beidhändig. Linkshändigkeit ist zum Teil erblich und kommt bei Frauen weniger häufig vor als bei Männern (Lurito & Dziedzic, 2001).

In zahlreichen Studien konnte eine Beziehung zwischen Händigkeit und Lokalisation des Sprachzentrums gezeigt werden (Knecht, Deppe et al., 2000; Knecht, Dräger et al., 2000; Pujol et al., 1999; Rasmussen & Milner, 1977; Sabbah et al., 2003; van der Kallen et al., 1998). Erstmals wurde von Rasmussen und Milner (1977) über den Zusammenhang von Händigkeit und Sprachlateralisation (erhoben mittels Wada-Test) in einer Gruppe von Epilepsiepatienten berichtet. Laut ihrer Ergebnisse wären 96% der Rechtshänder und 70% der Linkshänder linkssprachdominant. Weitere jeweils 15% der Linkshänder hätten eine bilaterale oder rechtshemisphärische Sprachrepräsentation. Allerdings gelten Rückschlüsse vom gestörten Gehirn auf das gesunde wegen Reorganisationsprozessen (insbesondere bei Kindern) als problematisch (s. o.) (Gaillard et al., 2000; Rasmussen & Milner, 1977).

In einer fMRT-Studie von Pujol und Mitarbeitern (1999), bei der die Sprachlateralisation bei gesunden Probanden während der Bearbeitung einer Wortgenerierungsaufgabe ermittelt wurde, zeigte sich bei 96% der Rechtshänder eine Dominanz zugunsten der

linken Hemisphäre, bei den restlichen 4% eine bilaterale Aktivierung (siehe Abbildung 23).

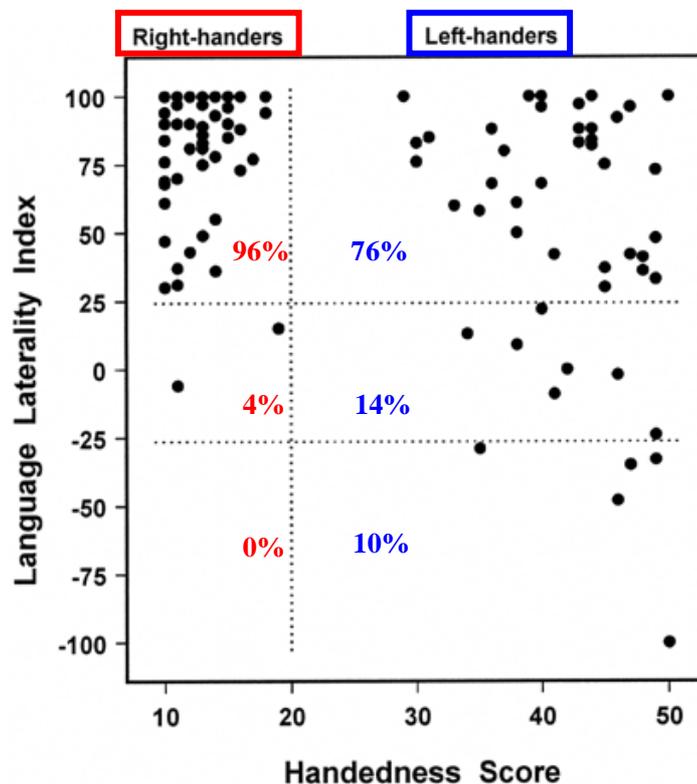
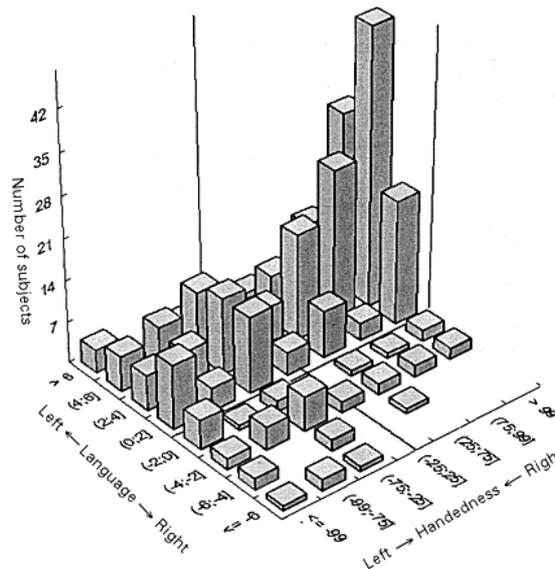


Abbildung 23: Sprachlateralisation bei Links- bzw. Rechtshändern (Pujol et al., 1999)

Ein weniger einheitliches Bild fand die Arbeitsgruppe um Pujol bei den linkshändigen Versuchspersonen. Nur 76% der Probanden zeigte während des Generierens eine klare Dominanz der linken Hemisphäre, 14% hatten eine bilaterale und 10% eine deutlich rechtshemisphärische Aktivierung (siehe Abbildung 23). Knecht und Mitarbeiter konnten einen linearen Zusammenhang zwischen dem Vorkommen rechtshemisphärischer Sprachdominanz und dem Grad der Händigkeit mittels funktioneller transkranialer Dopplersonographie (fTCD) nachweisen (siehe Abbildung 24) (Knecht, Dräger et al., 2000).



RH-Sprachdominanz:
 27 % bei extremer Linkshändigkeit (-100)
 4 % bei extremer Rechtshändigkeit (+100)

Abbildung 24: Zusammenhang zwischen dem Grad der Händigkeit und der Sprachlateralisation (Knecht, Dräger et al., 2000)

In ihrer Studie war der Anteil linkshändiger Versuchspersonen mit rechtshemisphärischer Sprachdominanz allerdings deutlich höher als bei Pujol (27% im Vergleich zu 10% bei Pujol et al., 1999).

2.6.3. Geschlecht

Die Frage nach dem Einfluss des Geschlechts auf die Sprachlateralisation lässt sich weitaus schwerer beantworten als die nach dem Einfluss der Händigkeit: Die häufigste Annahme lautet heutzutage, dass Sprache bei Männern klarer zur linken Hemisphäre lateralisiert ist als bei Frauen (Coney, 2002; Crossman & Polich, 1988; Hausmann & Gunturkun, 1999; McGlone, 1980; Pugh et al., 1996; Shaywitz et al., 1995).

Nach Crossman und Polich (1988) sind besonders bei phonologischen Entscheidungsaufgaben (Reimentscheidungen) Geschlechtseffekte mit einer deutlicheren links-hemisphärischen Sprachlateralisation bei Männern zu beobachten. Einschränkend zur o. g. Studie von Shaywitz und Mitarbeitern (1995) bleibt anzumerken, dass sich die Geschlechtsunterschiede nur bei einer sehr spezifischen phonologischen Aufgabe zeigten (Entscheidung, ob zwei visuell dargebotene Nonwörter sich reimen; siehe

Abschnitte 2.6.1.4.3. und 2.6.1.5.3.). Allerdings konnte Coney (2002) mit gesichtsfeldabhängiger Darbietung derselben Aufgaben wie Shaywitz und Kollegen (1995) die Geschlechtseffekte replizieren. Unabhängig von der Lateralisation fanden verschiedene Studien mit funktioneller transkranieller Dopplersonographie zudem bilateral signifikant höhere Blutflussgeschwindigkeiten bei Frauen als bei altersgematchten Männern (Arnolds & von Reutern, 1986; Vriens, Kraaijer, Musbach, Wieneke, & van Huffelen, 1989). In einer Studie von Schlösser und Kollegen, die hemisphärenspezifische Aktivierungen bei Männern und Frauen anhand der Wortgenerierungsaufgabe untersuchten, fanden sich trotz einer großen Übereinstimmung der beteiligten Areale zwei Regionen, die bei Frauen signifikant deutlicher aktiviert waren (Schlösser et al., 1998). Dabei handelte es sich um den rechten orbito-frontalen sowie mesialen Frontalkortex. Allerdings ist bei dieser Studie die relativ geringe Stichprobengröße ($N = 6$) als eher kritisch zu betrachten (Schlösser et al., 1998).

In mehreren Studien, bei denen auch andere Sprachparadigmen und Erhebungsmethoden eingesetzt wurden, konnte dagegen kein Geschlechtseffekt auf die Sprachlateralisation nachgewiesen werden (Buckner, Raichle, & Petersen, 1995; Droste, Harders, & Rastogi, 1989a, 1989b; Frost et al., 1999; Knecht, Deppe et al., 2000; Knecht, Dräger et al., 2000; van der Kallen et al., 1998; Xu et al., 2001). Auch Untersuchungen an Patienten nach einseitigen Schlaganfällen konnten, unter Kontrolle der unterschiedlichen Inzidenzrate von Schlaganfällen bei Männern und Frauen, kein erhöhtes Aphasierisiko bei einer der Gruppen feststellen (Kertesz & Sheppard, 1981).

2.6.4. Herleitung der Fragestellungen

Aufgrund der beträchtlichen Nachteile des Wada-Tests (siehe Abschnitt 2.5.1.) bei der präoperativen Diagnostik von Epilepsie- und Tumorkranken wurde bereits vielfach versucht (siehe Abschnitte 2.5., 2.6.1.4. und 2.6.1.5.), mit alternativen nichtinvasiven Techniken und Untersuchungsparadigmen eine ähnlich zuverlässige und valide Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zu erreichen (z. B. Übereinstimmung zwischen Wada-Test und fTCD-Aktivierung beim Wortgenerieren (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998); siehe Abschnitt 2.3.3.1.2.).

In der Studie von Krach und Hartje wurde versucht, mit einem im Vergleich zu den klassischen Ansätzen (Wortgenerierung, semantische Generierung etc.; siehe Abschnitt 2.6.1.4.) alternativen Verfahren, die Bestimmung der sprachdominanten Hemisphäre zu verbessern (Krach & Hartje, 2006). Hierzu wurde eine selbstentwickelte Reimgenerierungsaufgabe als Alternative zum klassischen Wortgenerierungsparadigma getestet und die Sprachlateralisation mittels funktioneller transkranieller Dopplersonographie bestimmt. Die Durchführung der Wortgenerierungsaufgabe bei gleichzeitiger Registrierung der Blutflussveränderung hatte sich zuvor in zahlreichen Studien als die am besten geeignete Variante erwiesen, sprachrelevante Areale nichtinvasiv zu lokalisieren (Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998; Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998; Lurito et al., 2000; Sabbah et al., 2003; van der Kallen et al., 1998). In der Studie von Krach und Hartje zeigte sich, dass mit der Reimgenerierungsaufgabe eine im Vergleich zur Wortgenerierungsaufgabe noch deutlichere Lateralisation zur angenommenen sprachdominanten linken Hemisphäre erreicht wurde (Krach & Hartje, 2006). Die Vermutung war, dass dabei insbesondere der Prozess des Generierens in Kombination mit einer phonologischen Aufgabe zu einer stärkeren Aktivierung der sprachlichen Areale führen würde (Calvert et al., 2000; Krach & Hartje, 2006). Die Hauptkritikpunkte an der Studie betrafen zum einen das Fehlen eines objektiven Kriteriums der Sprachlateralisation, wie z. B. in Form von Wada-Test Ergebnissen oder fMRT-Untersuchungen, zum anderen die schwache räumliche Auflösung der fTCD (siehe Abschnitte 2.3.3. und 2.4.), aufgrund derer keine Aussagen über die beteiligten sprachrelevanten Hirnstrukturen gemacht werden konnten.

Aufbauend auf den viel versprechenden Ergebnissen der vorherigen Untersuchung war das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Reim- und Wortgenerierungsaufgabe mittels zweier verschiedener Bildgebungsverfahren (fTCD und fMRT) vergleichend zu untersuchen und im Hinblick auf ihre Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre nichtinvasiv, dennoch aber zuverlässig zu lokalisieren, zu bewerten. Gleichzeitig sollte mit Hilfe der funktionellen Kernspintomographie gezeigt werden, welche Hirnregionen speziell an der Verarbeitung phonologischer Inhalte (vs. lexikalischer Inhalte) beteiligt sind und ob es eventuell Strukturen gibt, die für die Generierung (vs. Entscheidung) von Wörtern oder Reimen zuständig sind. Eine der Kernannahmen der Studie von Krach und Hartje war, dass speziell mit einer Kombination von Generierungsaufgabe und phonologischer Aufgabe eine noch zuverlässigere und robustere Sprachlateralisation

als mit den bisher eingesetzten klassischen Verfahren gelingen könnte (s. o.). Ein besonderes Interesse gilt daher der *Interaktion* zwischen Generierung und phonologischer Aufgabe, also einer vermuteten zusätzlichen Aktivierung, die sich nur bei der speziellen Kombination dieser beiden Aufgabentypen ergeben würde. Um diese Interaktion berechnen zu können, bedurfte es zweier zusätzlicher Aufgaben, einer Reim- und einer Wortentscheidungsaufgabe (siehe Abschnitte 2.2.4.2.2. und 3.1.3.3.), die eigens für die vorliegende Studie entwickelt wurden (siehe Abschnitte 3.1.3.2.1. und 3.1.3.2.2.). Diese vier Aktivierungsbedingungen (Wort- und Reimentscheidung sowie Wort- und Reimgenerierung) ermöglichen über ein faktorielles fMRT-Untersuchungsdesign (siehe Abschnitte 2.2.4.2.2. und 3.1.3.3.), welches in Anlehnung an die Arbeit von Friston und Mitarbeitern ausgewählt und umgesetzt wurde, einen möglichen Interaktionseffekt zu berechnen (Friston et al., 1996). Beide Entscheidungs- (lexikalische- und phonologische Entscheidung) sowie Generierungsaufgaben (lexikalische- und phonologische Generierung) wurden so ähnlich wie möglich gestaltet (zeitlicher Ablauf, Anzahl der Stimuli etc.), um eine Vergleichbarkeit der Aufgaben gewährleisten zu können (siehe Abschnitt 3.1.3.). Von großer Bedeutung für die vorliegende Studie war zudem die Untersuchung einer möglichst hohen Anzahl an Probanden, die zu beiden Messzeitpunkten (fMRT- und fTCD-Untersuchung) an der Studie teilnehmen würden. Erst anhand dieser an beiden Untersuchungen beteiligten Stichprobe, im folgenden als Substichprobe bezeichnet, können schließlich Vergleiche zwischen den verschiedenen Bildgebungsmethoden bezüglich ihrer Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre zuverlässig und robust zu lokalisieren, vorgenommen werden. Um eine Willkürlichkeit bei der Bestimmung der fMRT-Lateralitätsindizes zu vermeiden (Jansen et al., submitted), wurden zwei verschiedene Ansätze (Fernández- und Voxelcount-Ansatz; siehe Abschnitte 2.2.5.3.3. und 3.1.4.6.2.) gewählt und hinsichtlich ihrer Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre zuverlässig zu identifizieren, miteinander verglichen.

Aufgrund der teils widersprüchlichen Befunde zur Lateralisation der Sprache bei unterschiedlich stark ausgeprägter Händigkeit und unterschiedlichem Geschlecht wurden beide Untersuchungen nur an rechtshändigen männlichen Studierenden durchgeführt. So sollte mit größtmöglicher Sicherheit (ohne über ein objektives Kriterium in Form eines Wada-Tests zu verfügen) gewährleistet werden, dass die sprachrelevanten Regionen der Versuchspersonen nach links lateralisiert sind (siehe Abschnitte 2.6.2. und 2.6.3.).

Zusammenfassung der Hauptziele der Studie:

1. Das zuverlässigste Untersuchungsparadigma (Wort- oder Reimgenerierungsaufgabe) hinsichtlich der Fähigkeit, die sprachdominante Hemisphäre zu aktivieren, sollte bestimmt werden.
→ **Vergleich der Paradigmen**
2. Die Untersuchungsmethoden (fMRT und fTCD) sollten einander kritisch gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Fähigkeit, zuverlässig die sprachdominante Hemisphäre zu lokalisieren, bewertet werden.
→ **Vergleich der Methoden**
3. Die unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung des fMRT-Lateralitätsindex (Fernández vs. Voxelcount) sollten kritisch betrachtet und der genaueste und zuverlässigste Ansatz bestimmt werden.
→ **Vergleich der fMRT-LI-Berechnungsansätze**
4. Ein möglicherweise auftretender Interaktionseffekt bei der Kombination einer Generierungsaufgabe mit einer phonologischen Aufgabe sollte analysiert und diskutiert werden.
→ **Interaktionseffekt**

2.7. Hypothesen der Studie

Hypothesen zur funktionellen Magnetresonanztomographie

Hypothese 1:

Aufgrund der Ergebnisse der Arbeit von Krach und Hartje, bei der sich mit funktioneller transkranieller Dopplersonographie für die Reimgenerierungsaufgabe gegenüber der Wortgenerierungsaufgabe eine deutlichere Lateralisation zur angenommenen sprachdominanten Hemisphäre zeigte, wird erwartet, dass sich dieses Ergebnis auch bei der Untersuchung mit funktioneller Magnetresonanztomographie sowohl auf Gruppenebene als auch auf individueller Ebene in der Region-of-Interest (ROI) wiederfinden lässt.

→ ***höherer fMRT-Lateralitätsindex bei Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ als bei Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ in der Region-of-Interest (ROI) sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene***

Hypothese 2:

Aufgrund der Befunde zum Aktivierungsindex (fTCD-AI) in der vorherigen Arbeit (Krach & Hartje, 2006) wird erwartet, dass bei der Reimgenerierungsaufgabe im Gegensatz zur Wortgenerierungsaufgabe ein generell höheres Aktivierungsniveau vorzufinden ist, welches sich durch eine erhöhte Voxelanzahl in den Regions-of-Interest oder über höhere *t*-Werte der Aktivierungscluster auf individueller Ebene belegen lässt.

→ ***höhere Voxelanzahl in den ROIs bei Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ als bei Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ und Aktivierungscluster mit höheren *t*-Werten in den sprachrelevanten Arealen auf individueller Ebene***

Hypothese 3:

Es wird erwartet, dass die Wortgenerierungsaufgabe, ähnlich wie in der Literatur zu diesem Thema beschrieben (siehe Abschnitt 2.6.1.5.1.), zuverlässig sprachrelevante Areale (sowohl auf Gruppenebene als auch auf individueller Ebene), insbesondere im Bereich des linken inferioren Frontallappens (BA 44/45 und 47), aktiviert.

→ ***Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ aktiviert zuverlässig sprachrelevante Areale (sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene)***

Hypothese 4:

Es wird erwartet, dass die Reimgenerierungsaufgabe sich gleichermaßen zuverlässig dazu eignet, sprachrelevante Areale (auch sowohl auf Gruppen- als auch auf individueller Ebene), insbesondere im Bereich des linken inferioren Frontallappens (BA 44/45 und 47), zu aktivieren.

→ ***Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ aktiviert zuverlässig sprachrelevante Areale (sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene)***

Hypothese 5:

Abgeleitet aus den Hypothesen 1 bis 4 ergibt sich die Hypothese, dass bei einer direkten Kontrastierung beider Aufgabenbedingungen linkshemisphärische sprachassoziierte Regionen stärker bei Kontrast „Reim- minus Wortgenerierung“ aktiviert sein sollten als bei Kontrast „Wort- minus Reimgenerierung“

→ Deutlichere Aktivierung sprachrelevanter linkshemisphärischer Areale bei Kontrast „Reim- minus Wortgenerierung“ als bei Kontrast „Wort- minus Reimgenerierung“

Hypothese 6:

Aufgrund der im Zusammenhang mit phonologischer (im Vergleich zu lexikalischer) Verarbeitung gefundenen erhöhten kognitiven Aktivität (Lurito et al., 2000) sollten beide phonologische Aufgaben (Reimentscheidung und Reimgenerierung) zusammengekommen eine stärkere Aktivierung in den sprachrelevanten Arealen auslösen als beide lexikalische Aufgaben (Wortentscheidung und Wortgenerierung).

→ stärkere Aktivierung sprachrelevanter Areale bei Kontrast „Reim- minus Wortaufgaben“ als bei Kontrast „Wort- minus Reimaufgaben“

Hypothese 7:

Aufgrund der im Zusammenhang mit Generierungsaufgaben im Vergleich zu Entscheidungsaufgaben gefundenen erhöhten kognitiven Aktivität (Adcock et al., 2003; Brazdil et al., 2005; Fu et al., 2002) sollten Reim- und Wortgenerierung zusammengekommen eine stärkere Aktivierung in den sprachrelevanten Arealen auslösen als Reim- und Wortentscheidung.

→ stärkere Aktivierung sprachrelevanter Areale bei Kontrast „Generierungs- minus Entscheidungsaufgaben“ als bei Kontrast „Entscheidungs- minus Generierungsaufgaben“

Hypothese 8:

Der Interaktionseffekt (siehe Abschnitte 2.2.4.2.2. und 3.1.3.3.), also das speziell Zusätzliche einer Kombination der phonologischen Aufgabe mit dem Prozess des Generierens, sollte auf Gruppenebene zu einer selektiven Aktivierung eines linkshemisphärischen sprachrelevanten Areals führen. Über eine genauere Lokalisation kann nur spekuliert werden, da bisher keine vergleichbaren Aufgaben untersucht wurden.

→ Kontrast „Interaktion“ (zwischen phonologischer Aufgabe und Generierung) führt zu selektiver Aktivierung eines sprachrelevanten linkshemisphärischen Areals auf Gruppenebene

Hypothese 9:

Es wird erwartet, dass mit beiden fMRT-LI-Berechnungsmethoden, einmal nach Ausmaß des Signalunterschiedes zwischen zwei Bedingungen (fMRT-LI_{Fernández}) und einmal nach der Anzahl aktivierter Voxels (fMRT-LI_{Voxelcount}), die sprachdominante Hemisphäre gleichermaßen zuverlässig vorhergesagt wird

→ **beide Berechnungsarten des fMRT-Lateralitätsindex (Fernández- vs. Voxelcount-Ansatz) sollten sich nicht hinsichtlich der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre unterscheiden**

Hypothesen zur funktionellen transkranialen Dopplersonographie**Hypothese 1:**

Ähnlich wie in der Studie von Krach und Hartje wird erwartet, dass im Gruppenmittel der fTCD-Lateralitätsindex bei der Reimgenerierungsbedingung signifikant über dem fTCD-Lateralitätsindex der Wortgenerierungsbedingung liegt.

→ **höherer fTCD-Lateralitätsindex bei der Reim- als bei der Wortgenerierung**

Hypothese 2:

Die gleiche Annahme gilt aufgrund der Ergebnisse der vorherigen Studie für den fTCD-Aktivierungsindex.

→ **höherer fTCD-Aktivierungsindex bei der Reim- als bei der Wortgenerierung**

Hypothesen zum Vergleich der fTCD- und fMRT-Daten**Hypothese 1:**

Bei den Versuchspersonen, die zu beiden Zeitpunkten an der Untersuchung teilgenommen haben, sollte eine hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Untersuchungsmethoden im Lateralitätsindex bzw. in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre gefunden werden.

→ **hohe Übereinstimmung zwischen fTCD-LI und fMRT-LI in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre**

Hypothese 2:

Da der Versuchsablauf (inhaltlich sowie zeitlich) der Generierungsbedingungen bei beiden Untersuchungsmethoden (fMRT und fTCD) möglichst ähnlich gehalten wurde, wird angenommen, dass sich daher auch nicht die gezeigte Leistung der Versuchspersonen (gemessen über die Anzahl mental generierter Wörter bzw. Reime) zwischen den Untersuchungsmethoden signifikant unterscheidet.

→ Die Leistung bei Wort- und Reimgenerierung unterscheidet sich nicht signifikant zwischen den Untersuchungsmethoden

3. METHODE

3.1. Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT)

Bei der Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie ist eine detaillierte Beschreibung/Offenlegung jedes Analyseschrittes notwendig, um so eine Willkürlichkeit der Ergebnisdarstellung zu vermeiden (siehe Abschnitt 2.2.5.3.1.) und um gleichzeitig die Nachprüfbarkeit der Auswertungsschritte zu ermöglichen.

3.1.1. Stichprobe

3.1.1.1. Rekrutierung der Versuchspersonen für die fMRT-Studie

Acht Probanden der fMRT-Studie hatten bereits an der fTCD-Studie im Jahr 2003 teilgenommen (Krach & Hartje, 2006). Von den Probanden, die sich damals bereit erklärten, gegebenenfalls an einer Folgestudie mit funktioneller Kernspintomographie teilzunehmen, wurde die Telefonnummer bzw. E-Mail Adresse aufgenommen und so der Kontakt für die fMRT-Studie hergestellt. Weitere Versuchspersonen wurden über Aushänge (siehe Anhang I) in der Universität gesucht. Vergütung für die Teilnahme an der fMRT-Studie waren 15 €. Auf Wunsch erhielten die Probanden auch einen digitalen Ausdruck der MRT-Darstellung ihres Gehirns.

3.1.1.2. Ausschlusskriterien

Als Teilnehmer der Studie wurden nur männliche rechtshändige Probanden (Lateralitätsquotient $> +50$) zwischen 20 und 45 Jahren mit Deutsch als Muttersprache akzeptiert. Zur Erfassung der Händigkeit wurde das Edinburgh-Händigkeitsinventar (siehe Abbildung 25) eingesetzt, in dem bei zehn alltäglichen Tätigkeiten, die von kulturellen, sozioökonomischen und geschlechtsspezifischen Faktoren unbeeinflusst sind, die bevorzugte Hand erfragt wird (Oldfield, 1971). Ermittelt wird ein Lateralitäts-

quotient $LQ = \frac{R-L}{R+L} \times 100$, dessen Wert zwischen +100 (völliger Rechtshändigkeit) und -100 (völliger Linkshändigkeit) liegt.

Weiterhin mussten die Probanden eine normale Sehstärke aufweisen, die aber gegebenenfalls auch durch Kontaktlinsen (Brillen waren aufgrund möglicher Interferenzen mit der Aufnahme nicht erlaubt!) korrigiert werden konnte.

Wegen des starken Magnetfeldes, dem man während der Messung ausgesetzt wird, durften Versuchspersonen mit Herzschrittmacher oder Metallimplantaten (z. B. Aneurysma Clips) im Gehirn nicht teilnehmen. Außerdem wurde vor der Untersuchung explizit nach Operationen in der Vergangenheit gefragt, um auszuschließen, dass Metallfragmente o. ä. sich noch im Körper befinden. Probanden mit Angst vor zu engen Räumen oder Röhren, mit neurologischen Erkrankungen oder psychiatrischen Störungen in der Vergangenheit sowie Probanden mit Medikamenten- oder Drogenmissbrauch wurden von der Studie ausgeschlossen. Piercings, Ohrringe, Schlüssel, Kreditkarten o. ä. mussten vor der fMRT-Untersuchung abgenommen bzw. abgelegt werden. Über jeden einzelnen Punkt wurden die Probanden ausführlich vor der Untersuchung informiert und bestätigten dies anschließend mit einer schriftlichen Einverständniserklärung (siehe Anhang II-IV).

Zusätzlich wurde ein Fragebogen zur Erfassung biographischer Daten wie Alter und Schulabschluss entworfen. Der Fragebogen enthielt zudem Fragen nach dem Vorliegen neurologischer Erkrankungen oder verzögerter sprachlicher Entwicklung in der Kindheit (siehe Anhang V).

Händigkeitsfragebogen

Bitte geben Sie Ihre bevorzugte Hand bei den folgenden Tätigkeiten an, indem Sie ein **+** in die entsprechende Spalte eintragen. Ist die Bevorzugung so stark, dass Sie die Tätigkeit – außer wenn Sie gezwungen sind – nie mit der anderen Hand ausführen würden, tragen Sie bitte ein **++** ein. Nur dann, wenn Sie wirklich unentschieden sind, tragen Sie in beide Spalten ein **+** ein.

Einige der Tätigkeiten erfordern beide Hände. In diesem Fall ist der Teil der Aufgabe (oder das Objekt), für den (das) wir Ihre Handpräferenz wissen möchten, fett gedruckt.

Versuchen Sie bitte, alle Fragen zu beantworten. Lassen Sie eine Frage nur dann aus, wenn Sie gar keine Erfahrung mit der entsprechenden Tätigkeit haben.

Vielen Dank!

Tätigkeit	links	rechts
1. Schreiben		
2. Zeichnen		
3. Werfen		
4. Schere		
5. Zahnbürste		
6. Messer (ohne Gabel)		
7. Löffel		
8. Besen - obere Hand		
9. Streichholz anreiben - Streichholz		
10. Schachtel öffnen - Deckel		

11. Gibt es einen Grund dafür (z.B. Verletzung), dass Sie die Präferenz oder die Gewohnheit, Ihre Hand bei den oben genannten Tätigkeiten einzusetzen, geändert haben?

Ja Nein

12. Haben Sie irgendwann einmal ein spezielles Training oder eine Ermutigung erhalten, eine bestimmte Hand bei gewissen Tätigkeiten zu benutzen?

Ja Nein

13. Wenn Ihre Antwort zu Frage 11 oder zu Frage 12 „JA“ ist, erklären Sie bitte warum:

Abbildung 25: Edinburgh-Händigkeitsinventar (Oldfield, 1971)

3.1.1.3. Zusammensetzung der Stichprobe

An der Untersuchung nahmen $N = 38$ Studierende verschiedener Fakultäten der Universität Bielefeld teil. Aufgrund anatomischer Auffälligkeiten des Gehirns mussten fünf Probanden von der statistischen Analyse ausgeschlossen werden. Das Durchschnitts-

alter der verbleibenden 33 Probanden betrug $M = 28.45$ Jahre ($SD = 5.68$ Jahre); nur zwei von ihnen waren älter als 40 Jahre. Der Mittelwert des Lateralitätsquotienten (LQ) nach Erfassung der Händigkeit mit dem Edinburgh-Händigkeitsinventar (Oldfield, 1971) betrug $LQ = + 89.35$ ($SD = 12.19$).

3.1.2. Versuchsdurchführung und Versuchsablauf

3.1.2.1. Ort der fMRT-Datenerhebung

Ort der Experimentdurchführung war der Kernspintomographieraum der *Gemeinschaftspraxis Radiologie und Nuklearmedizin Bielefeld Zentrum* in der Alfred-Bozi-Str. 3 in 33602 Bielefeld.

3.1.2.2. Apparaturen der fMRT-Studie

Die technische Ausstattung des Experiments bestand aus einem Siemens MAGNETOM Symphony 1.5 T Ganzkörpertomographen (Software Syngo MR 2004A, Siemens Medical Solutions) mit einer Standardkopfspule, einem MR-Steuercomputer, einer Konsole, einem Präsentationsnotebook (Acer TravelMate 435 LCi), einem Beamer (Panasonic LCD Projector), einer Triggerimpulsbox (Optokoppler für Konversion des Lichtsignals in TTL-Signal; HFBR2825, AGILENT), zwei Response-Boxen, einer Receiver-Box (4N35-Optokoppler für Konversion des Lichtsignals in TTL-Signal) und einer Plexiglasscheibe. Zur Präsentation der Stimuli wurde das Programm „ShowPics⁷“ verwendet (Sand, Merz, & Deppe, 1995-2003). Das Notebook für die Stimulusdarbietung war über das Triggerimpulskabel mit dem MR-Steuercomputer verbunden. So war es möglich, die Präsentation der Stimuli exakt zeitgleich mit der Messung des MR-Tomographen zu starten. Die Aufzeichnung der psychologischen Leistung (Entscheiden oder Generieren, s. u.) erfolgte über das simultane Drücken der Response-Boxen mit beiden Händen. Das dabei ausgelöste Lichtsignal wurde über

⁷ ShowPics Version 3.0a, Klinik und Poliklinik für Neurologie, Universität Münster, Autoren: Dipl.-Phys. M. Sand, Dipl.-Ing. R. Merz und Dipl.-Phys. M. Deppe. Für die Überlassung der „ShowPics“ Software und für die freundliche Unterstützung danke ich Herrn Dipl.-Phys. J. Sommer, Neurologische Klinik, Medizinische Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Lichtwellenleiter bis zur Receiver-Box geleitet. Die Umwandlung der Lichtsignale in elektronische Signale (mit Hilfe eines 4N35-Optokopplers) fand in der Receiver-Box statt. Anschließend wurden die elektronischen Signale an das Notebook weitergeleitet und dort registriert. Der MR-Steuercomputer wurde schließlich über die Konsole im MTA-Raum bedient (siehe Abbildung 26).

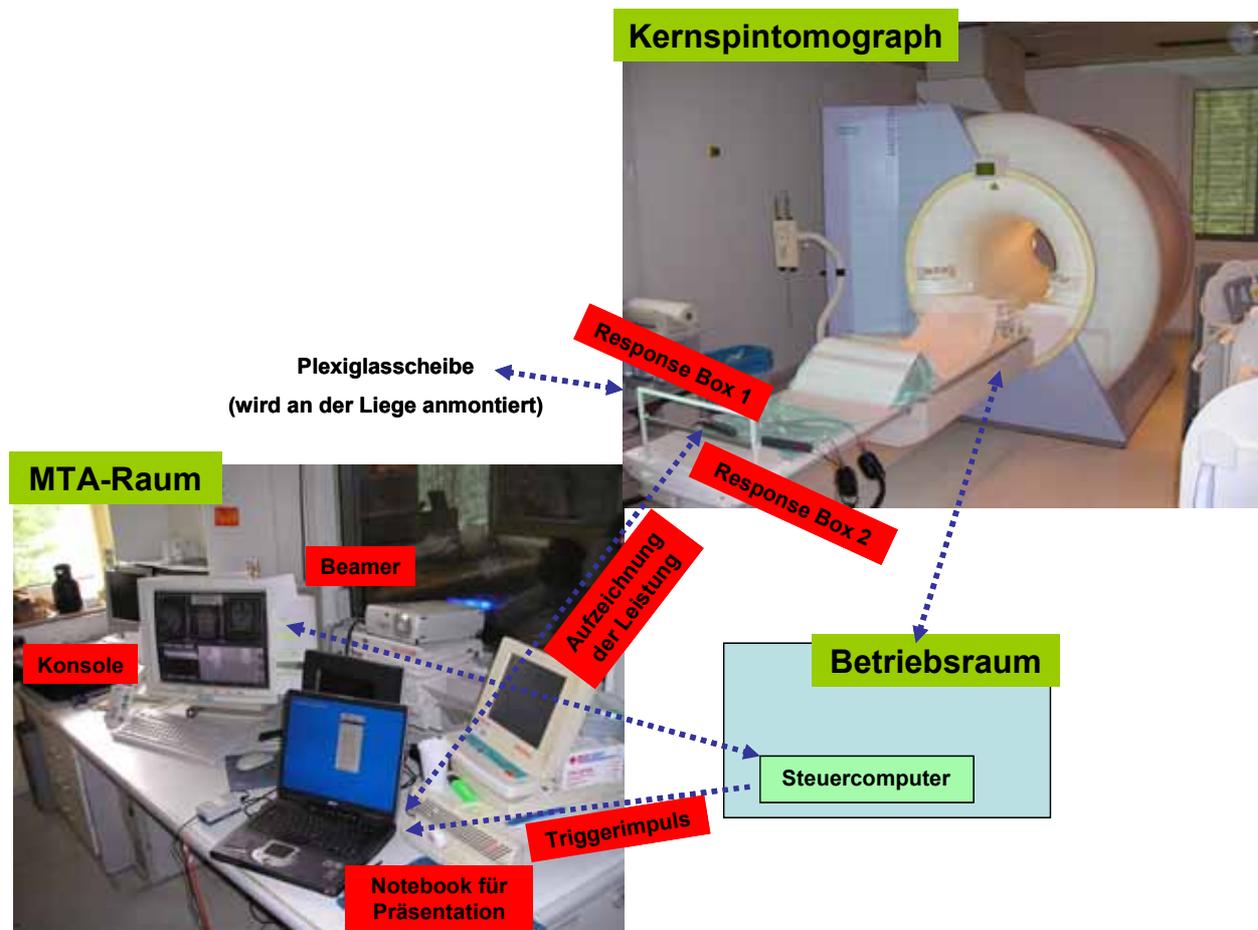


Abbildung 26: Apparaturen und Räumlichkeiten der fMRT-Studie

3.1.2.3. Herstellung der Apparaturen

3.1.2.3.1. Plexiglasscheibe

Zur Präsentation der Stimuli wurde eine 120 cm x 120 cm x 1,5 cm große Plexiglasscheibe auf einer Seite mit einer matten, transluzenten Flüssigkeit besprüht, so dass es anschließend möglich war, lesbare Lichtsignale auf die Scheibe zu projizieren. Die Plexiglasscheibe wurde mit einer eigens für diesen MR-Tomographen gebauten

Halterung senkrecht stehend am Fußende der Liege positioniert. Die Halterung bestand aus nicht magnetischem Aluminium und konnte mühelos an- und abgenommen werden.

3.1.2.3.2. Response-Boxen

Bei der Entwicklung der Response-Boxen wurden zwei massive Hartplastikstäbe (20 cm Länge, 5 cm Durchmesser) so präpariert, dass sich ihre Enden durch leichten Druck aneinanderpressen ließen. Am Ende eines Plastikstabes wurden auf gleicher Höhe die Lichtwellenleiter angebracht, so dass beim Zusammendrücken der Enden ein Kontakt entstehen und das Lichtwellensignal gesendet werden konnte. Über 3 m lange Lichtwellenleiterkabel wurde das Signal anschließend an die Receiver-Box weitergeleitet (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Response-Boxen, Receiver-Box und Lichtwellenleiter

3.1.2.3.3. Receiver-Box

In der Receiver-Box fand die Transformation der Lichtsignale in elektrische Signale mit Hilfe eines 4N35-Optokopplers statt. Das elektrische Signal wurde danach über einen USB-Anschluss an das Notebook übertragen und konnte dort, ähnlich einem linken oder rechten Mausklick, aufgezeichnet werden. Auf der Receiver-Box befanden sich zudem zwei rote LED-Lämpchen, die zur Kontrolle bei Tastendruck jeweils entsprechend aufleuchteten (links bei linkshändigem Tastendruck, rechts bei rechtshändigem Tastendruck) (siehe Abbildung 27). Eine ausführliche Beschreibung zur Herstellung

dieser Art von Response-Box/Receiver-Box findet sich bei Sommer und Kollegen (Sommer et al., 2004).

3.1.2.3.4. Triggerimpulskabel

Bei dem Triggerimpulskabel handelte es sich um einen Lichtwellenleiter, der ein optisches Signal vom MR-Steuercomputer an das Präsentationsnotebook lieferte. Dieses optisch gelieferte Start- oder Triggersignal wurde in einer speziell entwickelten Box ebenfalls per Optokoppler (HFBR2825, AGILENT) in ein elektrisches Signal umgewandelt. Nach der Umwandlung in ein elektrisches Signal (TTL-Signal) wurde der Triggerimpuls über den Parallelport an das Notebook weitergeleitet und zum Start der Präsentation eingesetzt.

3.1.2.4. Versuchsvorbereitung

Vor Beginn jeder Untersuchung wurden die Probanden gebeten, die „Information über die Studie“ und die Einverständniserklärung sorgfältig zu lesen und, sofern sie mit den Versuchsbedingungen einverstanden waren, zu unterschreiben (siehe Anhang II-IV). In dem Handout „Information über die Studie“ wurde über die Zielsetzung der Studie, über den Untersuchungsablauf, die Dauer der Untersuchung sowie über eventuelle Risiken einer fMRT-Studie informiert (siehe Anhang II-IV). Es wurde zudem explizit darauf hingewiesen, dass die Daten der Untersuchung streng vertraulich behandelt und nur für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet werden. In einem hervorgehobenen Absatz wurde der Proband zusätzlich darüber aufgeklärt, dass die Möglichkeit bestünde, während der strukturellen Messungen einen Tumor, eine Zyste o. ä. im Gehirn zu finden. Falls der Proband die Möglichkeit eines Zufallsbefundes für sich nicht in Kauf nehmen wollte, wurde ihm nahe gelegt, die Teilnahme an der Studie abzulehnen. Zuletzt wurde der Proband noch über die Vergütung der Teilnahme an der Studie aufgeklärt. Nach dem Lesen der „Information über die Studie“ wurden die Teilnehmer gebeten, auf zwei Fragebögen Angaben zur Erfassung biographischer Daten (Alter, Schulabschluss, Händigkeit) und zu eventuell vorbestehenden neurologischen Erkrankungen oder verzögerter kindlicher Sprachentwicklung zu machen (s. o.). Anschließend wurden die Versuchspersonen über die in der Studie verwendeten Geräte und über den genauen Ablauf des Experiments informiert. Wenn danach keine weiteren Fragen oder Zweifel von Seiten der Probanden bestanden, wurden ihnen nacheinander

die Instruktionen der Bedingungen vorgelegt, und es wurde zu jeder Aufgabe ein Beispiel bearbeitet (siehe Anhang VI-IX). In Anschluss an das Lesen der Instruktionen wurden die Probanden gebeten, am Untersuchungsnotebook einen Übungsdurchgang mit einem Beispiel pro Bedingung durchzuführen. Dies sollte die Probanden mit den einzelnen Bedingungen sowie der Schnelligkeit der zeitlichen Abfolge der Stimuli vertraut machen. Gab es danach keine weiteren Fragen oder Zweifel auf Seiten der Probanden, wurden sie gebeten, sich auf die Liege des Kernspintomographen zu legen. Der Kopf des Probanden wurde mit Schaumkissen und Plastikpads in einer bequemen Lage lose fixiert, um leichten Bewegungen während der Untersuchung vorzubeugen und eine angenehme Kopfhaltung zu ermöglichen. Um ein bequemes Liegen zu gewährleisten, wurde zusätzlich ein flaches, „medizinisches“ Kissen unter den Kniekehlen positioniert. Danach wurden den Probanden die Antworttasten in die Hände und für eventuelle Notfälle ein Luftdrucknotschalter auf den Bauch gelegt. Anschließend wurde die Kopfspule samt zweifach gebrochenem Spiegelsystem über dem Kopf des Probanden befestigt und eine Ölkapsel als Kontrast an die linke Wange geklebt. Dies war notwendig, um bei der Nachbearbeitung der Bilder stets sicher sein zu können, nicht aufgrund der radiologischen Konvention „rechts = links“ und „links = rechts“ die Hemisphären zu verwechseln. Daraufhin wurden die Probanden automatisch in den Tomographen gefahren und ein letzter Sehtest über das zweifach gebrochene Spiegelsystem gemacht. Falls es keine Komplikationen gab, verließ der Versuchsleiter daraufhin für die gesamte Zeit der Aufnahme den Raum.

3.1.2.5. Anatomische Messung

Nach einer zehnhundertmsec Localizermessung (1 Schicht, FOV 280 mm, Schichtdicke 8 mm, TE = 5 ms, TR = 20 ms, Basisauflösung 192 mm, Phasenauflösung 75%) wurden die Koordinaten für die folgende hochauflösende, anatomische Messung festgelegt. Dabei wurde darauf geachtet, für die anatomische Serie das komplette Gehirn des Probanden zu erfassen. Die anatomische Messung (FOV-Auslese 256 mm (224 x 256), FOV-Phase 87.5%, Schichtdicke 1 mm, TR = 12 ms, TE = 5.68 ms, 2 Mittelungen, Schichten in 3D-Block 208, Phasenoversampling 0%, Schichtoversampling 0%, Phasenkodierrichtung A >> P, Sagitale Ausrichtung, Matrix 256 x 224) hatte eine Dauer von 14.24 min, währenddessen die Probanden ohne einer Aufgabe nachzugehen versuchen sollten, so still wie möglich zu liegen. Nach der Messung wurde von der anwesenden medizinisch-technischen Assistentin ein kurzes Screening des Gehirns

vorgenommen, um mögliche anatomische Auffälligkeiten entweder auszuschließen oder gegebenenfalls näher untersuchen zu können. Bei zwei Probanden wurde im Anschluss an die funktionelle Messung eine weitere zweiminütige T_2 -gewichtete Messung vorgenommen, um eventuelle Multiple Sklerose-Herde ausschließen zu können.

3.1.2.6. Funktionelle Messung

Zur Planung der funktionellen Messung wurde, ebenso wie bei der Planung der anatomischen Messung, das Localizer-Image als Orientierung herangezogen. Hierbei wurde darauf geachtet, den kompletten Kortex über 25 Schichten mit einer T_2^* -gewichteten Gradienten-Echo EPI-Sequenz (TR = 3000 ms, TE = 50 ms, FOV = 210 mm, Schichtdicke 3.3 mm, Distanzfaktor 10%, SNR = 1.04) abzudecken. Um eine möglichst exakte Messung der interessierenden Kortexregionen (Frontal, Temporal, Parietal und Occipital) vornehmen zu können, wurde darauf verzichtet, Aktivierungen des Cerebellums in die Messung mit aufzunehmen. Die Ausrichtung der Schichten war parallel zur AC-PC Linie. Um die funktionelle Messung zu starten, wurden die Versuchspersonen über die Kopfhörer aufgefordert, mit beiden Antworttasten jeweils zweimal zu drücken. Auf diese Weise wurde der Befehl „Start-on-Trigger“ des Präsentationsprogramms „ShowPics“ (Sand et al., 1995-2003) ausgelöst. Der Triggerimpuls setzte synchron mit dem Start der funktionellen Messung ein und startete daraufhin die Präsentation des Ablaufscripts (siehe Abschnitt 3.1.2.2.).

3.1.2.7. Versuchsablauf während funktioneller Aufnahmen

Der Beginn der Präsentation der Stimuli erfolgte stets nach fünf Dummy-Durchgängen (15 Sekunden) und einer sich daran anschließenden Ruhephase von weiteren 15 Sekunden. Die Dummy-Durchgänge wurden verwendet, um sog. T_1 -gewichtete Anfangsbilder zu vermeiden, die ansonsten die Aktivierungen der ersten Messungen schwer interpretierbar gemacht hätten. Während der folgenden 24 Minuten wurden die vier Untersuchungsbedingungen in randomisierter Reihenfolge jeweils im Wechsel mit Ruhephasen präsentiert (siehe Abschnitt 3.1.3.3. sowie Abbildung 31). Die vier Aktivierungsbedingungen (Wortentscheidung, Reimentscheidung, Reimgenerierung und Wortgenerierung) dauerten jeweils ebenso wie die Ruhebedingung exakt 15 Sekunden pro Durchgang. Ein Zyklus, d. h. eine Ruhephase plus eine Aktivierungsbedingung, dauerte damit 30 Sekunden. Insgesamt umfasste die gesamte funktionelle Messung 48

Durchgänge mit 12 Aktivierungsphasen pro Bedingung. Während der gesamten Aufnahme saß der Versuchsleiter im MTA-Raum neben dem Präsentationsnotebook und notierte zur Sicherheit, zusätzlich zur elektronischen Aufzeichnung der Leistung über das Notebook, sämtliche Tastendrucke der Versuchspersonen (erkennbar über das zeitgleiche Aufleuchten der LED-Lämpchen auf der Receiver-Box) auf einem speziell dafür angelegten Handzettel (siehe Anhang X).

Bei den ersten drei Probanden (Vpn 1, 2 und 3) konnte die Leistung während der funktionellen Messung wegen technischer Fehler nicht aufgezeichnet werden.

3.1.2.8. Präsentation der Stimuli

Die Präsentation der Stimuli bzw. der Aufgabenstellung erfolgte über einen Beamer (siehe Abbildung 26), der im MTA-Raum vor dem Sichtfenster angebracht und mit dem Präsentationsnotebook verbunden war. Die Stimuli wurden in spiegelverkehrter Sicht durch das Sichtfenster von hinten auf die horizontal an der Liege befestigte Plexiglasscheibe projiziert. Vor jeder Datenerhebung wurde durch den Versuchsleiter in einem Probedurchlauf sichergestellt, dass die Aufgabenbedingungen sowie die Stimuli im Einzelnen deutlich sichtbar und zentriert auf der Plexiglasscheibe zu erkennen waren. Über das direkt über den Augen der Probanden befestigte zweifach gebrochene Spiegelsystem konnten die in der MR-Röhre liegenden Probanden die präsentierten Stimuli sowie die Bedingungen auf der Plexiglasscheibe lesen.

3.1.3. Stimulusmaterial und Aufgabenstellung

3.1.3.1. Aufgabenstellung und Art der Reizdarbietung

Die Untersuchung bestand aus vier Aufgaben: Zwei Entscheidungs- und zwei Generierungsaufgaben. Eine der Generierungs- und Entscheidungsaufgaben war dabei lexikalischer (Wortentscheidungs- bzw. Wortgenerierungsaufgabe), eine phonologischer (Reimentscheidungs- bzw. Reimgenerierungsaufgabe) Art. Der Ablauf der Bedingungen sowie die Stimuli innerhalb der Bedingungen wurden anfänglich einmalig randomisiert, anschließend allerdings für alle Versuchspersonen im Ablauf gleichermaßen dargeboten. Zwischen zwei Bedingungen lag jeweils eine Ruhephase von 15 Sekunden,

während der die Instruktion für die folgende Bedingung präsentiert wurde. Pro Bedingung gab es zwölf Durchgänge mit jeweils einer Länge von 15 Sekunden. Insgesamt dauerte die funktionelle Messung damit 24 Minuten. Zuzüglich eines vorangestellten Dummy-Durchgangs (siehe Abschnitt 3.1.2.7.) belief sich die komplette funktionelle Datenerhebung damit auf 24 Minuten und 15 Sekunden.

3.1.3.2. Instruktionen der verschiedenen Aufgaben

Als Basis dienten die in der Diplomarbeit entwickelten Instruktionen für die Reim- sowie die *Wortgenerierungsaufgabe* (Krach & Hartje, 2006). Bei der Erstellung der Instruktionen für die Reim- und *Wortentscheidungsaufgabe* wurde in Bezug auf Form und Ablauf darauf geachtet, sie den Generierungsbedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten (siehe Anhang VI-IX). Jede Instruktion begann mit dem Titel der Bedingung und dem Hinweis, dass jeweils vor einer Aktivierungsphase der Titel der im Folgenden zu bearbeitenden Aufgabe erscheinen würde. Anschließend wurde der zeitliche Ablauf und eine Beispielaufgabe pro Bedingung gegeben sowie auf eventuelle Fehler bei der Bearbeitung der Aufgabe hingewiesen (z. B. bei der Wortgenerierungsaufgabe: „Bitte vermeide es, immer den gleichen Wortstamm zu nutzen, wie z. B. Tortenheber, Tortenguss, Tortenbäcker etc.“). Jede Instruktion endete mit der expliziten Bitte, sich während der gesamten Messung so wenig wie möglich zu bewegen.

3.1.3.2.1. Wortentscheidungsaufgabe

Bei der Wortentscheidungsaufgabe wurden die Versuchspersonen dazu aufgefordert, jeweils nach Erscheinen eines Stimuluswortes auf der Plexiglasscheibe, zu entscheiden, ob es sich bei dem präsentierten Wort um ein reguläres Wort des deutschen Sprachgebrauchs oder um ein frei erfundenes Pseudo- bzw. Nonsens-Wort handelte. Die Probanden sollten dabei bei jedem korrekten deutschen Wort mit Daumen und Zeigefinger beidhändig⁸ die Antworttasten zusammendrücken. Handelte es sich bei dem präsentierten Stimuluswort nach Meinung der Versuchsperson dagegen um ein frei erfundenes Nonsens-Wort, sollten die Antworttasten nicht gedrückt werden. Nach zwei Sekunden verschwand das Stimuluswort von der Projektionsfläche. Nach einer weiteren Sekunde erschien ein neues Stimuluswort, auf welches in gleicher Weise reagiert

⁸ Da auch Fingerbewegungen einen Einfluss auf das CBFV-Signal haben können, sollte so eine selektive Aktivierung einer Hemisphäre vermieden werden

werden sollte. Dieser Ablauf wiederholte sich fünfmal innerhalb eines Durchgangs. Nach exakt 15 Sekunden endete die Wortentscheidungsaufgabe. Um die Probanden über das Ende der Wortentscheidungsaufgabe zu informieren, wurde auf dem Plexiglasbildschirm für einen Zeitraum von 500 ms ein rotes Licht eingeblendet. Danach waren die Probanden dazu angehalten, sich zu entspannen und nicht mehr über die präsentierten Wörter nachzudenken. Nach acht Sekunden folgte die nächste Instruktion.

Alle Nonsense-Wörter waren nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbar und wären aufgrund der Schreibweise mögliche reguläre deutsche Wörter gewesen (z. B. „LOME“). Bei der Konstruktion der Nonsense-Wörter wurde beachtet, dass keines der Nonsense-Wörter, laut ausgesprochen, einem regulären deutschen Wort gleich (z. B. „LAIM“ entspräche laut ausgesprochen dem deutschen Wort „LEIM“ und wäre damit nicht geeignet gewesen).

Des Weiteren wurde auf eine ungefähre Gleichverteilung der Anfangsbuchstaben bei Wort- und Nonsense-Wortstimuli geachtet. In jeder Gruppe (Nonsense-Wörter und reguläre deutsche Wörter) waren gleichviel ein- wie zweisilbige Wörter bzw. Nonsense-Wörter (siehe Anhang XII). Der erste Buchstabe war in jeder Bedingung rot eingefärbt (siehe Anhang VI-IX). Alle Wort- bzw. Nonsense-Wortstimuli waren vierletterig und wurden in Großschrift (Arial, Größe 96, fett) dargeboten. Die Versuchspersonen wurden bei der Bearbeitung der Instruktion explizit dazu aufgefordert, während der Aufgabe nur nach deutschen Wörtern zu suchen und nicht zu überlegen, ob es sich bei einem Nonsense-Wort vielleicht um ein reguläres Wort in einer Fremdsprache handeln könnte. Als reguläre deutsche Wörter wurden Wörter mit einem Schwierigkeitsindex (Quelle: Universität Leipzig, URL: <http://www.wortschatz.informatik.uni-leipzig.de>) zwischen 14 und 16 ($M = 15$) ausgewählt. Insgesamt wurden gleichviel reguläre wie irreguläre Wortstimuli während der zwölf Durchgänge präsentiert, d. h. je 30 Wörter bzw. Nonsense-Wörter (siehe Anhang XII). Die Wortentscheidungsaufgabe wurde in der Ruhephase mit der Instruktion „BEI WORT TASTEN DRÜCKEN“ angekündigt (siehe Anhang VIII).

3.1.3.2.2. Reimentscheidungsaufgabe

Bei der Reimentscheidungsaufgabe wurden die Versuchspersonen dazu aufgefordert, jeweils nach Erscheinen eines Nonsense-Wortpaares auf der Plexiglasscheibe zu entscheiden, ob sich das präsentierte Nonsense-Wortpaar reimte oder nicht. Dabei

sollten die Probanden bei dieser Aufgabe bei jedem korrekten Reim mit Daumen und Zeigefinger beidhändig (s. o.) die Antworttasten zusammendrücken. Reimte sich dagegen das präsentierte Nonsens-Wortpaar nach Meinung der Versuchsperson nicht, sollten die Antworttasten nicht gedrückt werden. Nach jeweils zwei Sekunden verschwanden die beiden Nonsens-Wörter von der Projektionsfläche. Nach einer weiteren Sekunde erschien ein neues Nonsens-Wortpaar, auf welches in gleicher Weise reagiert werden sollte. Dieser Ablauf wiederholte sich fünfmal innerhalb eines Durchgangs. Nach exakt 15 Sekunden endete die Reimentscheidungsaufgabe. Um die Probanden über das Ende der Aufgabe zu informieren, wurde, wie bei der Wortentscheidungsaufgabe, auf dem Plexiglasbildschirm für einen Zeitraum von 500 ms ein rotes Licht eingeblendet. Danach sollten die Probanden sich entspannen und nicht mehr über die präsentierten Nonsens-Wörter nachdenken. Nach acht Sekunden folgte die nächste Instruktion.

Alle Nonsens-Wortpaare waren nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbar und wären aufgrund der Schreibweise mögliche richtige deutsche Wörter gewesen (z. B. „OPHE JOFE“). Bei der Konstruktion der Nonsens-Wortpaare wurde wiederum beachtet, dass keines der Nonsens-Wörter laut ausgesprochen vom Klang her mit einem regulären deutschen Wort übereinstimmte (s. o.).

Des Weiteren wurde auf eine Gleichverteilung der Anfangsbuchstaben bei allen Nonsens-Wörtern geachtet. Bei der Konstruktion der Nonsens-Wörter wurden zudem die ungefähre Gleichverteilung der tongebenden Wortstellen innerhalb einer Phonemgruppe (z. B. -äu, -eu, -oy, -oi) und die Gleichverteilung zwischen den Phonemgruppen (z. B. -äu, -ph, -ks etc.) beachtet. Während der gesamten zwölf Durchgänge mit je fünf Reimentscheidungen pro Durchgang kam kein Nonsens-Wort doppelt vor, und keines der Paare hatte die gleiche Orthographie im tongebenden Wortteil (wie dies z. B. bei „KOFE JOFE“ der Fall wäre). Insgesamt gab es gleichviel ein- wie zweisilbige Nonsens-Wortpaare (siehe Anhang XII). Der erste Buchstabe war wie in jeder Bedingung rot eingefärbt. Alle Nonsens-Wörter waren vierlettrig und wurden in Großschrift dargeboten (s. o.). Jedes Nonsens-Wortpaar war durch ein Leerzeichen getrennt. Die Versuchspersonen wurden bei der Bearbeitung der Instruktion explizit dazu aufgefordert, sich die Nonsens-Wörter so deutsch wie möglich mental vorzusprechen. Die Reimentscheidungsaufgabe wurde in der Ruhephase mit der Instruktion „BEI REIM TASTEN DRÜCKEN“ angekündigt (siehe Anhang IX).

3.1.3.2.3. Wortgenerierungsaufgabe

Bei der Wortgenerierungsaufgabe wurden die Versuchspersonen dazu aufgefordert, nach Erscheinen eines Triggerwortes auf der Plexiglasscheibe, bei dem, wie in den anderen Bedingungen auch, der erste Buchstabe rot eingefärbt war, *gedanklich* so viele passende Wörter zu dem gleichen Anfangsbuchstaben zu generieren wie möglich. Dabei sollten die Probanden für jedes mental generierte Wort mit Daumen und Zeigefinger beidhändig (s. o.) die Antworttasten zusammendrücken. Nach zwei Sekunden verschwanden das Triggerwort und somit auch der Anfangsbuchstabe, auf den die Probanden passende Wörter generieren sollten. Nach 15 Sekunden endete die Wortgenerierungsaufgabe. Um den Probanden zu signalisieren, dass die Generierungsphase beendet ist, wurde auf dem Plexiglasbildschirm, wie auch in den anderen Bedingungen, für einen Zeitraum von 500 ms ein rotes Licht eingeblendet. Danach sollten die Probanden sich entspannen und nicht mehr gedanklich nach weiteren Wörtern suchen. Nach acht Sekunden folgte die nächste Instruktion.

Diese Versuchsbedingung wurde mit zwölf verschiedenen Triggerwörtern durchgeführt, die mit den Buchstaben A, B, D, E, H, K, L, M, N, R, S, W begannen (siehe Anhang XI). Die Reihenfolge der Buchstaben bzw. der Triggerwörter war randomisiert. Die ausgewählten Anfangsbuchstaben hatten sich in einer vorherigen Arbeit als diejenigen Buchstaben des Alphabets herausgestellt, auf die die Probanden im Mittel am meisten Wörter generieren konnten (Krach & Hartje, 2006). Als Triggerwörter wurden in 50% der Fälle reguläre deutsche vierlettrige Hauptwörter gewählt, die einen Schwierigkeitsindex zwischen 14 und 16 ($M = 15$) aufwiesen (siehe Abschnitt 3.1.3.2.1. und Anhang XI). Bei den anderen 50% der Triggerwörter wurden vierlettrige Nonsens-Wörter gewählt. Alle Nonsens-Wörter waren nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbar und wären aufgrund der Schreibweise mögliche richtige deutsche Wörter gewesen (z. B. „KIER“). Bei der Konstruktion der Nonsens-Wörter wurde ebenso wie bei den anderen Bedingungen darauf geachtet, dass keines der Nonsens-Wörter laut ausgesprochen einem regulären deutschen Wort glich (s. o.). In jeder Gruppe (Nonsens-Triggerwörter und deutsche Triggerwörter) waren gleichviel ein- wie zweisilbige Wörter bzw. Nonsens-Wörter. Alle Triggerwörter waren vierlettrig und wurden in Großschrift (s. o.) dargeboten. Die Versuchspersonen wurden bei der Bearbeitung der Instruktion explizit dazu aufgefordert, während des Generierens nicht wiederholt den gleichen Wortstamm zu verwenden, wie z. B. Tortenheber, Tortenguss, Tortenbäcker (siehe Anhang VI). Ansonsten war es den Probanden erlaubt, alle Wörter (inklusive Eigennamen) der

deutschen Sprache mental zu generieren. Die Wortgenerierungsbedingung wurde in der Ruhephase mit der Instruktion „WÖRTER MIT GLEICHEM ANFANGSBUCHSTABEN FINDEN“ angekündigt (siehe VI).

3.1.3.2.4. Reimgenerierungsaufgabe

Das Vorgehen bei der Reimgenerierungsaufgabe war dem der Wortgenerierungsaufgabe sehr ähnlich (siehe Anhang VII). Die Probanden sollten allerdings hierbei versuchen, *gedanklich* so viele reguläre deutsche Wörter wie möglich zu finden, die sich auf ein auf dem Plexiglasbildschirm zuvor dargebotenes Nonsense-Triggerwort reimten. Die ausgewählten Reimtriggerwörter hatten sich in einer vorherigen Arbeit als diejenigen zwölf Triggerwörter erwiesen, auf die die Probanden im Mittel die meisten korrekten deutschen Wörter generieren konnten (siehe Tabelle 9 sowie Anhang XI) (Krach & Hartje, 2006). Alle Nonsense-Triggerwörter waren nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbar und wären aufgrund der Schreibweise mögliche richtige deutsche Wörter gewesen (z. B. „WÄLL“). Bei der Konstruktion der Nonsense-Wörter wurde, wie in den anderen Bedingungen zuvor auch, darauf geachtet, dass keines der Nonsense-Wörter laut ausgesprochen einem regulären deutschen Wort glich (s. o.). Weiterhin war es wichtig, dass sich die Schreibweise des Triggerwortstammes von der normalerweise üblichen Schreibweise von Wörtern der deutschen Sprache unterschied. So wurde gewährleistet, dass die Probanden beim Generieren der Reimwörter nur auf das Klangbild (die Phonologie) achteten und sich nicht von anderen Merkmalen (z. B. dem Graphem) der Triggerwörter leiten ließen. Außerdem wurde bei der Erstellung der Triggerwörter beachtet, dass kein Phonem in der Art doppelt vorkam, dass ein Leistungstransfer von einer Aufgabe zur nächsten möglich gewesen wäre (wie z. B. bei Triggerwörtern wie „WÄLL“ und „SELL“). Wie bei den anderen Aufgaben, gab es auch in dieser Bedingung zwölf Durchgänge, mit dementsprechend zwölf verschiedenen Reimtriggerwörtern. Die Verteilung von ein- und zweisilbigen Triggerwörtern wurde auch in dieser Bedingung konstant gehalten (siehe Tabelle 9 sowie Anhang XI). Der erste Buchstabe war wie in jeder Bedingung rot eingefärbt. Alle Reimtriggerwörter waren vierlettrig und wurden in Großschrift (s. o.) dargeboten. Erlaubte Reimwörter waren alle Wörter des deutschen Sprachgebrauchs, in allen Konjugationen und Schreibweisen. Die Versuchspersonen wurden bei der Bearbeitung der Instruktion explizit dazu aufgefordert, sich die Nonsense-Worttrigger so deutsch wie möglich mental vorzusprechen („Bitte keines der Pseudowörter Englisch oder Französisch aus-

sprechen! In diesem Fall wäre es falsch, Wörter wie „tun“ oder „Huhn“ auf „**POON**“ zu generieren“). Der zeitliche Ablauf der Reimgenerierungsaufgabe war identisch mit dem der Wortgenerierungsaufgabe. Die Reimgenerierungsbedingung wurde in der Ruhephase mit der Instruktion „REIMENDE WÖRTER FINDEN“ angekündigt (siehe Anhang VII).

Tabelle 9: Reimtriggerwörter der fMRT-Studie

Trigger mit untypischem Wortstamm	Alternative Schreibweisen des Wortstammes	Beispiele für Reimwörter*
TAYS	-eis, -ais, -eiß	Reis, Mais, heiß
LEUA	-euer, -äuer	Feuer, Gemäuer
FLUU	-uh, -u, -ou, -oo	Schuh, zu, Clou (frz.), Poo (engl.)
OITE	-eu-, -äu-	Heute, Bräute
LAIN	-ei-, -ai-	Wein, Main
LADD	-att, -adt, -d, -t	Watt, Stadt, Rad, Kat
HÄHR	-eer, -ehr, -är, -air, -er, -aire	Teer, sehr, Bär, fair, wer, Claire
WÄLL	-ell	hell
AIER	-eier, -aier, -ayer, -eiher, -eyer	Leier, Maier, Bayer, Reiher, Schleyer
ZANT	-and, -ant, -andt	Land, Kant, angewandt
LÄUE	-eue, -äue	Treue, Säue
ZIIH	-ie, -ieh, -i	Knie, Vieh, Ski

Anmerkung: *alle Reimwörter wurden während der Untersuchung genannt

3.1.3.3. Entwicklung des faktoriellen Designs

In Anlehnung an die Arbeit von Friston und Kollegen, die den phonologischen Abruf bei Objekterkennung anhand eines faktoriellen Designs untersuchten, wurde das Design der vorliegenden Arbeit erstellt (Friston et al., 1996). Um das spezielle Aktivierungsmuster beim Zusammenspiel von Objekterkennung und phonologischem Abruf zu untersuchen, entwickelten Friston und Kollegen vier Bedingungen mit aufsteigendem Komplexitätsgrad (siehe Abbildung 28).

Phonologischer Abruf bei Objekterkennung

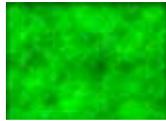
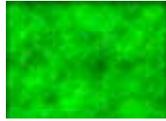
<p>A) „ja“ sagen bei abstraktem Bild (Farbbild)</p> <p>→ sprachl. Output, visuelle Analyse</p>		<p>= „ja“</p>
<p>B) „ja“ sagen bei konkretem Bild (Schmetterling)</p> <p>→ sprachl. Output, visuelle Analyse, Objekterkennen</p>		<p>= „ja“</p>
<p>C) Benennen des konkreten Bildes</p> <p>→ sprachl. Output, visuelle Analyse, Objekterkennen, phonolog. Abruf</p>		<p>= „Schmetterling“</p>
<p>D) Benennen der Farbe des abstrakten Bildes</p> <p>→ sprachl. Output, visuelle Analyse, phonolog. Abruf</p>		<p>= „grün“</p>

Abbildung 28: Das faktorielle Design (Friston et al., 1996)

In allen vier Bedingungen übereinstimmend wurden eine „visuelle Analyse“ sowie ein „sprachlicher Output“ als Grundvoraussetzung verlangt (Abbildung 28, Aufgaben A bis D). In einer Bedingung kam zusätzlich das „Objekterkennen“, in einer weiteren der „phonologische Abruf“ hinzu (Abbildung 28, Aufgaben B und D). Die dritte Bedingung integrierte schließlich alle vier Komponenten (Abbildung 28, Aufgabe C). Damit ergaben sich jeweils zwei Bedingungen, die einen „phonologischen Abruf“ erforderten (Abbildung 28, Aufgaben C und D) sowie zwei Bedingungen, die „Objekterkennen“ verlangten (Abbildung 28, Aufgaben B und C). Um das besondere einer Kombination von „Objekterkennen“ und „phonologischem Abruf“ herauszufinden (den Interaktionseffekt; s. u.), müssen bei einer statistischen Analyse schließlich zwei Subtraktionen hintereinander gerechnet werden (siehe Abbildung 29).

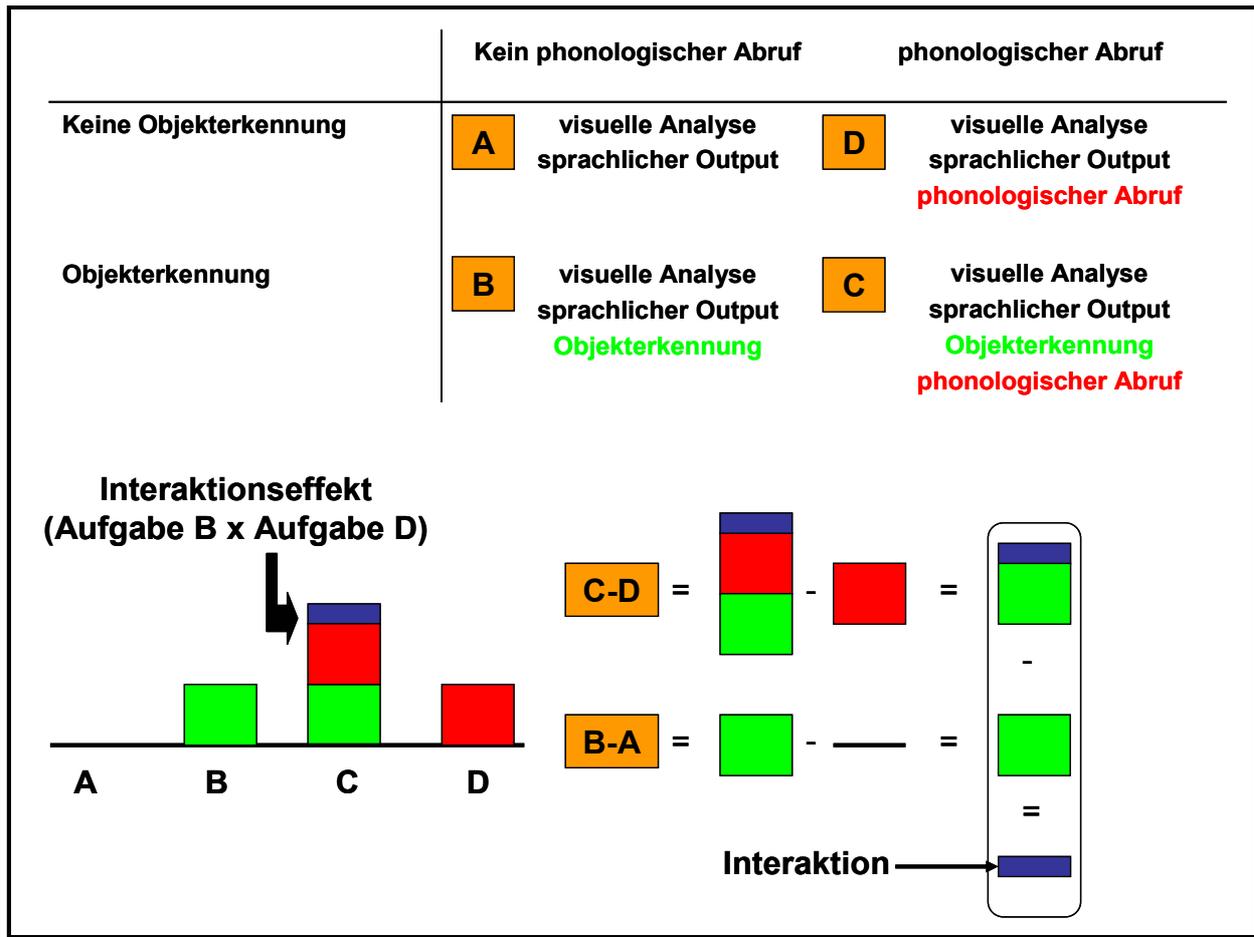


Abbildung 29: Berechnung der Interaktion (Friston et al., 1996)

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, diese Art von Design auf die Untersuchung der Reimgenerierung zu übertragen. Analog zu Friston und Mitarbeitern wurden vier Bedingungen mit aufsteigendem Komplexitätsgrad entwickelt (siehe Abbildung 30). Allen vier Bedingungen gemein, ähnlich wie bei Friston und Kollegen, sind die „visuelle Analyse“ und der „sprachliche Output“. Zwei Bedingungen (Abbildung 30, Aufgaben B und C) beinhalten eine Komponente, die mit „Reim“ oder „Phonologie“ umschrieben werden kann, zwei Bedingungen (Abbildung 30, Aufgaben C und D) beinhalten eine Komponente, die als „Generierung“ beschrieben werden kann.

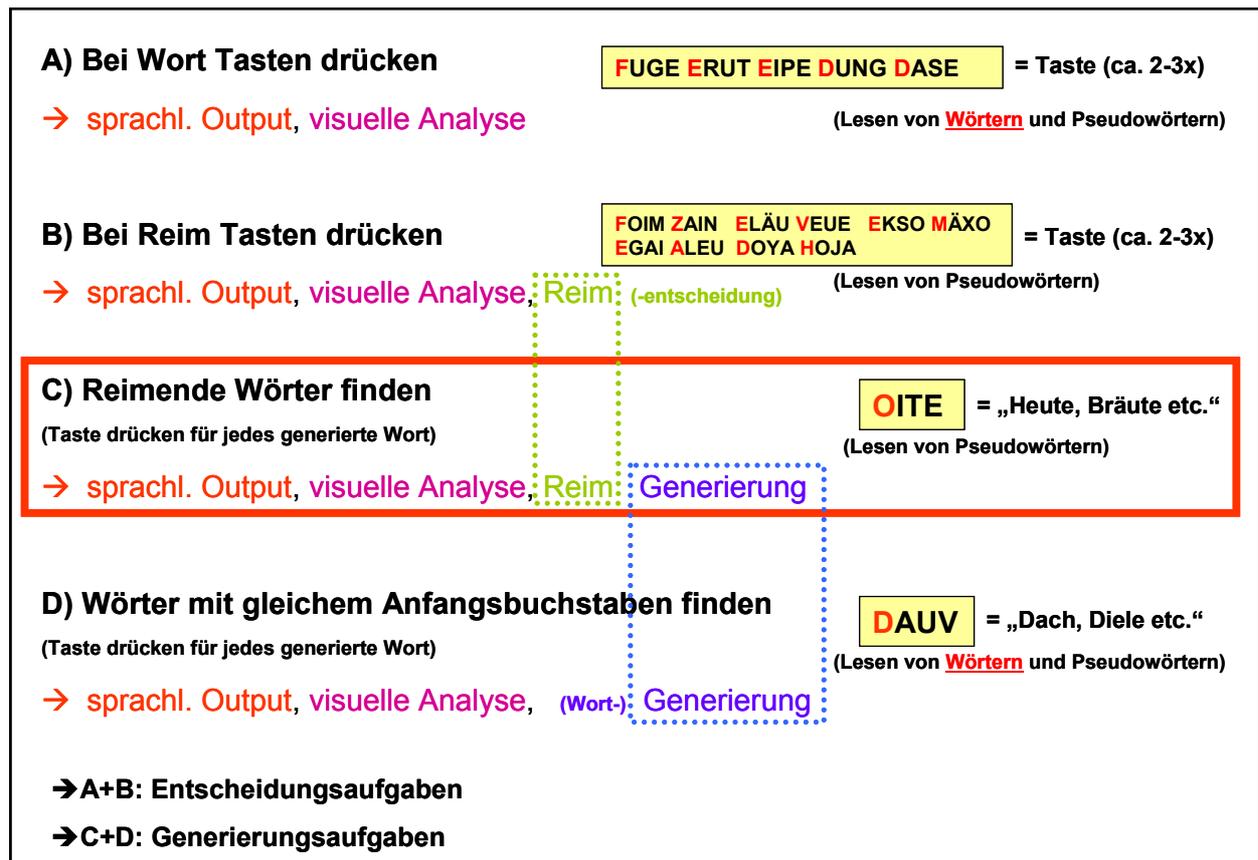


Abbildung 30: Das faktorielle Design der vorliegenden Studie

Die Bedingung C, die „Reimgenerierung“, umfasst alle vier Komponenten. Bei der Bedingung A (Abbildung 30) schließlich muss weder eine „phonologische“ Bearbeitung noch eine „Generierung“ vorgenommen werden.

Da bei den Bedingungen „Wort- und „Reimentscheidung“ im Gegensatz zur „Reim- und Wortgenerierung“ mehrmals pro Durchgang Wort- bzw. Nonsens-Wortstimuli präsentiert wurden (siehe Abbildungen 30 und 31), war der „visuelle Input“ bzw. die „visuelle Analyse“ von leicht unterschiedlicher Quantität. Die Qualität der Stimuli wurde dagegen jedoch über gleiche Konstruktionsprinzipien bei der Erstellung der Stimuli so ähnlich wie möglich gehalten (z. B. gleiche Wortlänge, gleiche Anzahl ein- und zweisilbiger Wörter, erster Buchstabe jeweils rot gefärbt etc.; siehe Abschnitt 3.1.3.2.). Bei der Wortentscheidungs- und Wortgenerierungsbedingung unterschied sich die visuelle Analyse zu den anderen Bedingungen zudem in dem Punkt, dass in 50% der Stimuli ein korrektes deutsches Wort gelesen (und damit visuell analysiert) werden musste.

Der „sprachliche Output“ zwischen den Bedingungen konnte dagegen nur ansatzweise konstant gehalten werden. Aus einer vorherigen Studie (Krach & Hartje, 2006) war bereits bekannt, dass bei der Wortgenerierungsaufgabe signifikant mehr Wörter

generiert werden als bei der Reimgenerierungsaufgabe. Da in den beiden ersten Bedingungen, der Wort- und Reimentscheidungsaufgabe, maximal fünf positive Reaktionen pro Durchgang möglich waren (und damit auch maximal fünf Tastendrucke pro Durchgang), ließ sich der „sprachliche Output“ nur grob schätzen und damit bloß näherungsweise angleichen.

Bei der Entscheidung für das faktorielle Design wurden verschiedene Aspekte berücksichtigt. Aus datenanalysetechnischen Gründen sollte die Länge eines Durchgangs stets so gewählt werden, dass sie ein vielfaches der TR (Repetition time) ergibt. In diesem Fall, bei der Wahl einer TR = 3000 ms, bot sich eine Länge pro Durchgang von 12 s oder 15 s an. Diese Zeiteinheit wurde auch in vorherigen Studien, z. B. bei fTCD-Messungen, gewählt und erwies sich als sehr geeignet (Krach & Hartje, 2006). In kürzeren Intervallen ist die gemessene Leistung, z. B. die Anzahl der generierten Reime bei der Reimgenerierungsaufgabe, meist zu gering, als dass man sinnvolle Schlussfolgerungen daraus ziehen könnte. Längere Intervalle führen häufig dazu, dass die Probanden ab einem bestimmten Punkt „abschalten“ bzw. die Konzentration nicht bis zum Ende aufrechterhalten können.

Gleichzeitig muss beachtet werden, dass ausreichend viele Wiederholungen einer Bedingung anvisiert werden sollten, um im Endeffekt ein gutes *Signal-Rausch-Verhältnis* zu erreichen. In vorherigen Studien zeigte sich, dass mit zehn bis zwölf Durchgängen pro Bedingung zuverlässige Aktivierungen nachgewiesen werden konnten (Wörmann et al., 2003). Zusätzlich zu den Aktivierungsbedingungen müssen zwischen den Durchgängen Ruhepausen eingelegt werden, damit der zerebrale Blutfluss wieder auf ein Baseline-Niveau zurückkehren kann. Auch diese sollten ein Vielfaches der TR ergeben, um bei der Datenanalyse unnötige Komplikationen zu vermeiden. Um das Design möglichst einfach zu gestalten, wurde beschlossen, die Länge der Ruhephasen der Länge der Aktivierungsphasen anzupassen. Innerhalb der Ruhephase sollte die Instruktion für die jeweils folgende Bedingung erscheinen. Um den Probanden nicht zuviel zuzumuten und um die Motivation über die gesamte Untersuchung aufrechtzuerhalten, sollte die Gesamtmesszeit in einem gewissen Rahmen gehalten werden. Funktionelle Studien gehen dabei größtenteils von einer Gesamtlänge von 40-60 Minuten aus (Quelle online unter: <http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/-Imaging/Common/fMRI-efficiency.shtml>; Stand: 5.12.2005), einschließlich der Messzeit für die strukturellen Aufnahmen, die meist zwischen 15 und 30 Minuten liegt.

Von ursprünglich vier entwickelten Varianten wurde dasjenige Design ausgewählt, das am besten mit den oben beschriebenen Parametern übereinstimmte (siehe Abbildung 31).

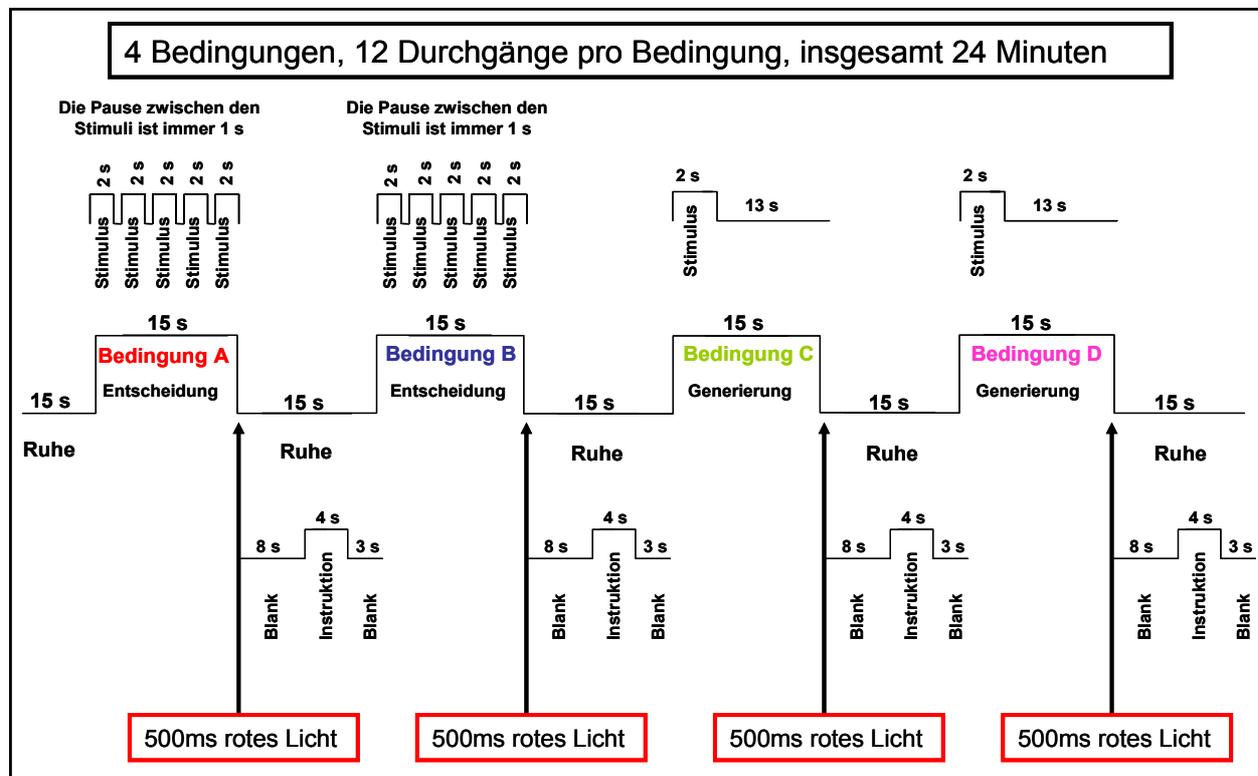


Abbildung 31: Untersuchungsablauf der vorliegenden Studie

Bei diesem Design wechseln sich Ruhe- und Aktivierungsphasen im 15-Sekunden Rhythmus ab, wobei im Vorhinein die Abfolge der vier Bedingungen einmalig randomisiert wurde (s. o.). Pro Bedingung gab es zwölf Durchgänge. In den Ruhephasen wurde jeweils die Instruktion für die nachfolgende Bedingung präsentiert. Die Ruhephasen unterteilten sich in drei Blöcke: Einem ersten, während dem über acht Sekunden der Bildschirm weiß blieb, gefolgt von einer vier Sekunden dauernden Präsentation der Instruktion und einem abschließenden Block von drei Sekunden, während dem der Bildschirm wiederum weiß blieb (siehe Abbildung 31). Insgesamt dauerte die funktionelle Messung damit 24 Minuten, währenddessen 480 komplette Aufnahmen des Gehirns gescannt wurden (TR = 3000 ms). Um T₁-gewichtete Bilder zu Anfang einer Messung zu verhindern, wurden fünf komplette Scans vorausgeschaltet,

bevor die eigentliche Messung bzw. die Präsentation der Stimuli gestartet wurde. Diese ersten fünf Images wurden bei der Datenanalyse nicht beachtet (s. o.).

3.1.4. Auswertung der funktionellen MRT-Daten

Die Analyse der Daten erfolgte mit SPM2 (Statistical Parametric Mapping Software, SPM; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK; online verfügbar unter URL: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>; Stand: 5.12.2005, s. o.). Um mit den Daten arbeiten zu können, müssen eine Reihe von Vorverarbeitungsschritten (Transformation und Bildausrichtung) durchgeführt werden (siehe Abschnitte 2.2.5. sowie 3.1.4.1.-3.1.4.3.). Anschließend wurde bei dem vorliegenden Datensatz die räumliche Anpassung (*spatial realignment*, *spatial normalization* sowie *spatial smoothing*) berechnet. Wie erwähnt, findet die zeitliche Anpassung hauptsächlich in Event-related Designs Anwendung und kann bei geblockten Designs vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 2.2.5.).

3.1.4.1. Transformation der Daten in ein SPM2-kompatibles Format

Die nach jeder Messung gespeicherten funktionellen Kernspindaten wurden zur Weiterverarbeitung im DICOM-Format (Digital Imaging and Communications in Medicine) auf zwei CDs pro Versuchsperson archiviert. Um die Daten schließlich mit SPM2 analysieren zu können, mussten sie zuvor ins *Analyze*-Format transformiert werden. Die Umwandlung der *medical image files* (DICOM-files) in ein SPM2-kompatibles Format (*Analyze*) wurde mit MRIConvert (online verfügbar unter URL: <http://lcn.uoregon.edu/~jolinda/MRIConvert>; Stand 5.12. 2005) durchgeführt.

3.1.4.2. Orientierung der Bilder

Um überhaupt mit der Vorverarbeitung der Bilder beginnen zu können, musste die generelle Ausrichtung der Bilder (strukturelle und funktionelle Bilder) jeweils zu Beginn standardisiert und neuorientiert werden, so dass die Bilder in SPM2-typischer Ausrichtung vorlagen. Verwendete Orientierungs-Parameter waren $[0.5 * \pi]$ für die Neigung („pitch“), $[1.5 * \pi]$ für die Drehung („roll“) und $[1 * \pi]$ für das Scheren („yaw“). Die

„*Crosshair-position*“ wurde zur Vereinheitlichung bei jedem Probanden in die anteriore Commissur (AC) gelegt.

3.1.4.3. Räumliche Anpassung

3.1.4.3.1. Räumliche Ausrichtung (*spatial realignment*)

Bei der räumlichen Ausrichtung wurde bei jeder Versuchsperson das erste Image der Serie (nach Entfernung der fünf Dummy-Scans) als Referenzimage gewählt. Alle folgenden Images (*brain volumes*) wurden daraufhin diesem Referenzimage angeglichen, bis sie schließlich die gleiche Ausrichtung hatten (mit Hilfe der *sinc interpolation*). Der Realignmentprozess, auch *Rigid Body Transformation* genannt, behandelt das Gehirn als einen festen Körper und verändert die Ausrichtung des Gehirns über sechs Parameter: *Translation* (Verschiebung) in allen drei Dimensionen (x-, y- und z-Achse) und *Rotation* (Drehung) um die drei Achsen (x-, y- und z-Achse) (siehe Abschnitt 2.2.5.1.1.) (Ashburner & Friston, 1997). Um bewegungskorrelierte Varianzen aufzuklären, wurden bei der Erstellung der *Designmatrix* diese sechs Parameter als zusätzliche Regressoren in die Analyse mit aufgenommen (siehe Abschnitt 2.2.5.2.5.). Am Ende der räumlichen Ausrichtung erhielt jedes Image das Prefix „r“, um den Stand der Vorverarbeitung zu dokumentieren.

3.1.4.3.2. Standardisierung (*spatial normalization*)

Das für die vorliegende Studie verwendete Hirn-Template setzte sich aus 152 Gehirnen zusammen und wird routinemäßig bei SPM-Analysen verwendet (*EPI-Template*, Montreal Neurological Institute, (Evans et al., 1994)). Als Quell-Image wurde das gemittelte bewegungskorrigierte Image jeder Versuchsperson ausgewählt. Als die zu normalisierenden Images wurden die 480 Images gewählt, die nach dem Realignmentprozess das Prefix „r“ bekommen hatten. Am Ende des Normalisierungsprozesses erhielt jedes der 480 Images zusätzlich das Prefix „w“⁹.

⁹ „w“ steht für „warp“ und bedeutet „Verzerrung“

3.1.4.3.3. Räumliches Glätten (*spatial smoothing*)

Die normalisierten Bilder wurden anschließend mit einem isotropen Gausschen-Kernel (*FWHM* 6 mm) räumlich geglättet. Als die zu glättenden Images wurden die 480 Images gewählt, die nach dem Realignment- und Normalisierungsprozess das Prefix „r“ und „w“ bekommen hatten. Am Ende des Smoothing-Prozesses erhielt jedes der 480 Images zusätzlich das Prefix „s“.

3.1.4.4. Statistische Analyse der funktionellen Daten

3.1.4.4.1. Modellspezifikation und Parameterschätzung

Die Erstellung der *Designmatrix* (siehe Abschnitt 2.2.5.2.1. sowie Abbildung 3) wurde in Scans durchgeführt (verwendete Parameter siehe Anhang XIII). Es wurden vier Aktivierungsbedingungen (1. Wortentscheidung, 2. Reimentscheidung, 3. Reimgenerierung und 4. Wortgenerierung) mit jeweils einer Länge von 5 Scans (15 Sekunden) sowie eine Ruhebedingung (5. Bedingung) mit einer Länge von 2.66 Scans (ersten 8 Sekunden des Ruheblocks) definiert. Als weitere Regressoren wurden die 6 Bewegungsparameter (*Translation* und *Rotation* jeweils über die x-, y-, und z-Koordinaten), die während der Realignment-Phase erstellt werden, eingeladen (siehe Abschnitt 2.2.5.2.4.)

Um Fehler bei der Eingabe zu vermeiden, wurden die Onsets der Events aus einer dafür erstellten Excel-Datei in das entsprechende Fenster kopiert. Die Richtigkeit der erstellten *Designmatrix* (*SPM.mat*-Datei) wurde anschließend für jede Versuchsperson über „*Review Design*“ geprüft. Nachdem die entsprechenden Aufnahmen mit der *SPM.mat*-Datei in Beziehung gesetzt (über den Befehl „*specify data*“) und das Design konfiguriert wurde, folgte der Schätzprozess („*Data Estimation*“). Die hierfür verwendeten Parameter waren größtenteils Default-Einstellungen (exakte verwendete Parameter siehe Anhang XIII).

3.1.4.4.2. Ergebnisberechnung (*Inferenzstatistik*)

Die im *Contrast-Manager* („*results section*“) erstellten Kontraste waren nach der Reihenfolge der Hypothesen angeordnet:

Tabelle 10: Berechnete Kontraste der vorliegenden Studie

Kontrast Nummer	Name des Kontrasts	Kontrastwerte				
		WE	RE	RG	WG	Ruhe
Kontrast 1	WG minus Ruhe	0	0	0	+1	-1
Kontrast 2	RG minus Ruhe	0	0	+1	0	-1
Kontrast 3	WG minus RG	0	0	-1	+1	0
Kontrast 4	RG minus WG	0	0	+1	-1	0
Kontrast 5	WE minus Ruhe	+1	0	0	0	-1
Kontrast 6	RE minus Ruhe	0	+1	0	0	-1
Kontrast 7	WE und WG minus RE und RG	+1	-1	-1	+1	0
Kontrast 8	RE und RG minus WG und WE	-1	+1	+1	-1	0
Kontrast 9	WG und RG minus WE und RE	-1	-1	+1	+1	0
Kontrast 10	WE und RE minus WG und RG	+1	+1	-1	-1	0
Kontrast 11	Interaktion	+1	-1	+1	-1	0

WE = Wortentscheidung; RE = Reimentscheidung; RG = Reimgenerierung; WG = Wortgenerierung

3.1.4.5. Random Effects Analyse (RFX-Analyse)

Bei der Random Effects Analyse wurde für jede Versuchsperson separat jeder o. a. Kontrast berechnet und statistisch im Kontext des General Linear Model (GLM) ausgewertet. Dafür werden so genannte Boxcar-Regressoren genutzt, über die die hämodynamische Antwort in dem Sinne gelegt wird, dass sie die Aktivierungen während jeder experimentellen Bedingung bestmöglich beschreiben. Wird diese Boxcar-Funktion an den Zeitverlauf jedes Voxels angepasst, bekommt man schließlich ein so genanntes „*Parameter Estimate Image*“ (auch *beta-image*), welches anzeigt, wie gut diese Funktion mit den fMRT-Daten eines jeden Voxels übereinstimmt. Wenn man anschließend lineare Kontraste berechnet, werden gewichtete *Beta-images* erzeugt (die sog. „*con-images*“), die die Signalunterschiede zwischen zwei oder mehreren Bedingungen abbilden. Um Aussagen über die Generalisierbarkeit der Ergebnisse machen zu können, wurden die jeweiligen „*con-images*“ auf einer zweiten Ebene („*second-level analysis*“) eingelesen (über den Befehl „*basic models*“ → „*one sample t-test*“) und für die Gesamtgruppe ausgewertet (siehe Abschnitt 2.2.5.2.5.). Auf eine Fixed Effects Analyse (FFX; siehe Abschnitt 2.2.5.2.5.) wurde verzichtet.

3.1.4.5.1. Wahl der statistischen Prüfgröße

In Abhängigkeit vom individuellen Aktivierungsniveau und sofern die Ergebnisse als sinnvoll interpretierbar erachtet wurden (max. Voxelanzahl pro Cluster ≤ 1000), wurde für jede Versuchsperson bei der Wort- und Reimgenerierungsaufgabe eine *SPM T-map* für die Schwellenwerte „*t-value*“ [$t = 1.28$], [$t = 1.65$], [$t = 2.33$], [$t = 3.11$], [$t = 3.75$], [$t = 4.31$] sowie [*family wise error corrected t* = 5.06, 5.39 und 5.82] berechnet. Als minimale Clustergröße wurden auf Versuchspersonenebene 10 zusammenhängende Voxels und auf Gruppenebene 25 zusammenhängende Voxels vorausgesetzt. Bei der Analyse auf Gruppen- wie auch auf Versuchspersonenebene wurden nur frontale Cluster (*y*-Koordinate ≥ 0) betrachtet. Bei der Dokumentation der an den Sprachprozessen beteiligten Hirnareale wurden alle Regionen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von $> 10\%$ bei einem „*local maximum radius = 10 mm*“ (laut „*automated anatomic labeling/aal-atlas*“; online verfügbar unter URL: <http://www.cyceron.fr/freeware>; Stand: 5.12.2005) zum Aktivierungscluster gehörten, ausgewählt (siehe Abschnitt 4.1.2.1 und 4.1.2.3., Tabellen 13-16 und 21-26 sowie Anhang XVIII-XIX).

3.1.4.6. Auswertung der funktionellen MR-Daten zur Ermittlung eines Lateralitätsindex (fMRT-LI)

3.1.4.6.1. Erstellung der Region-of-Interest (ROI)

Bei der Erstellung der Region-of-Interest wurde eine Variante gewählt, die sowohl funktionelles als auch anatomisches Wissen integrierte. In einem ersten Schritt wurde, wie in Abschnitt 3.1.4.5.1. beschrieben, für jede Versuchsperson unter verschiedenen Schwellenwerten eine *SPM T-map* erstellt. Daraufhin wurde anatomisches Wissen (mit Hilfe des „*automated anatomic labeling/aal-atlas*“; s. o.) genutzt, um den inferior-frontalen Kortex unter jedem Schwellenwert (*t-value*) zu lokalisieren. Mit dem SPM-Befehl „*goto nearest local maxima*“ wurden anschließend die Koordinaten sowie entsprechende *t*-Werte der Peak-Aktivierung im inferior-frontalen Kortex ermittelt und unter jedem Schwellenwert für jede Versuchsperson notiert (da aufgrund unterschiedlicher Aktivierungsniveaus zwischen Versuchspersonen die Aktivierung im inferior-frontalen Kortex nicht für jede Versuchsperson gleichermaßen ab einem bestimmten Schwellenwert signifikant wird; siehe Abschnitt 2.2.5.3.3.). In einem zweiten Schritt wurden für denjenigen Schwellenwert ($t = 3.11$), unter dem für die meisten Versuchspersonen eine signifikante Peak-Aktivierung im inferior-frontalen Kortex

gefunden wurde, der Mittelwert sowie die Standardabweichung für jede Koordinate (x-, y- und z-Koordinate) der Peak-Werte, sowohl für die Wort- als auch für die Reimgenerierungsaufgabe, berechnet. Diese Koordinatenmittelwerte (Wortgenerierung: $x = -55$, $y = 18$, $z = -5$; Reimgenerierung: $x = -51$, $y = 19$, $z = -5$) wurden anschließend in Voxel-Koordinaten (Wortgenerierung: $x = 67.5$, $y = 65.9$, $z = 23.3$; Reimgenerierung: $x = 65.5$, $y = 66.3$, $z = 23.4$) umgewandelt und bei der Erstellung der Region-of-Interest als „*Center of Sphere*“ verwendet. Anschließend wurde die ROI auf die andere Hemisphäre gespiegelt, um bei der fMRT-LI-Berechnung homologe Hirnregionen miteinander vergleichen zu können.

3.1.4.6.2. Wahl des Aktivitätsmaßes

Bei der Wahl des Aktivitätsmaßes wurde auf zwei verschiedene Arten vorgegangen: Zuerst erfolgte die Berechnung des fMRT-LI nach dem Ausmaß des Signalunterschiedes zwischen zwei Bedingungen ($LI_{\text{magnitude}}$) nach der vorgeschlagenen Variante von Fernández und Kollegen (siehe Abschnitt 2.2.5.3.3.). Im Folgenden wird diese Variante Fernández-Ansatz genannt. Berechnet wurden die Werte für ROIs mit den Radien 10 mm, 20 mm und 30 mm. Um einen sinnvollen Vergleich der $fMRT-LI_{\text{Fernández}}$ -Werte mit den fTCD-LI-Werten vornehmen zu können, wurden die $fMRT-LI_{\text{Fernández}}$ -Werte über die drei ROI-Radien zusätzlich zu einem Wert gemittelt (siehe Abschnitt 4.3.3.2.).

Anschließend wurde der fMRT-LI nach Anzahl aktivierter Voxels (LI_{extent}) für jede Versuchsperson für die Schwellenwerte [$t = 1.28$], [$t = 1.65$], [$t = 2.33$], [$t = 3.11$], [$t = 3.75$], [$t = 4.31$] sowie [*family wise error corrected*: $t = 5.06$, 5.39 und 5.82] errechnet (siehe Abschnitt 2.2.5.3.3.). Diese Berechnungsmethode wird im Folgenden Voxelcount-Ansatz genannt. Berechnet wurden auch hier die Werte für ROIs mit den Radien 10 mm, 20 mm und 30 mm („*diameter of sphere in mm*“). Als minimaler Wert für eine sinnvolle Interpretation des Lateralitätsindex wurden 25 Voxels in zumindest einer Hemisphäre vorausgesetzt. Bei weniger Voxels pro Hemisphäre wären die Schwankungen in den Ergebnissen, insbesondere bei hohen t -Schwellenwerten, zu stark gewesen. Um die individuellen Aktivierungswerte verschiedener Versuchspersonen besser miteinander vergleichen zu können, wurde jeweils der $fMRT-LI_{\text{Voxelcount}}$ -Wert (sowie der entsprechende t -Schwellenwert) markiert, bei dem die Voxelanzahl über beide Hemisphären addiert möglichst nahe der 500 (bei einem Radius von 10 mm) oder

der 1000 (bei den Radien 20 mm und 30 mm) lag (siehe Abschnitt 2.2.5.3.3. (Klöppel & Büchel, 2005; Specht, Willmes et al., 2003)).

Um einen sinnvollen Vergleich der fMRT-LI_{Voxelcount}-Werte mit den fTCD-LI-Werten vornehmen zu können, wurden die Werte, die nach der oben beschriebenen Variante markiert und ausgewählt wurden, zusätzlich über alle drei ROI-Radien zu einem Wert gemittelt (siehe Abschnitt 4.3.3.2.).

Die Berechnung beider Aktivitätsmaße sowie die Erstellung der ROIs wurden mithilfe verschiedener mittels MATLAB ([The MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing](http://www.mathworks.com); URL: <http://www.mathworks.com>) selbstprogrammierter SPM2-kompatibler Scripte von Herrn Dr. Jansen, Universität Münster, ermöglicht.

Der fMRT-Lateralitätsindex wurde mit der Formel:
$$\text{fMRT-LI} = \frac{L - R}{R + L}$$
 berechnet.

3.2. Methode der funktionellen transkraniellen Dopplersonographie (fTCD)

Ähnliches wie bei der Methode der funktionellen Magnetresonanztomographie gilt auch für die funktionelle transkranielle Dopplersonographie: Auch hier ist eine detaillierte Beschreibung/Offenlegung jedes Analyseschrittes notwendig, um so eine Willkürlichkeit bei der Darstellung der Ergebnisse zu vermeiden und um gleichzeitig die Nachprüfbarkeit der Auswertungsschritte zu ermöglichen.

3.2.1. Stichprobe

3.2.1.1. Rekrutierung der Versuchspersonen für die fTCD-Studie

Ein Teil der fTCD-Datenerhebung fand bereits im Jahr 2003 im Rahmen der Diplomarbeit statt (Krach & Hartje, 2006). Für diese Arbeit wurden ursprünglich 23 Versuchspersonen rekrutiert, von denen allerdings im Endeffekt nur 19 Versuchspersonen für die Ergebnisberechnung herangezogen wurden. In einer zweiten Datenerhebungsphase wurde versucht, diejenigen Versuchspersonen der fMRT-Studie für eine Untersuchung mit fTCD zu gewinnen, die noch nicht bei der ersten Messphase im

Jahre 2003 teilgenommen hatten. Von den Probanden, die sich bei der fMRT-Untersuchung bereit erklärten, gegebenenfalls an einer Folgestudie mit funktioneller transkranieller Dopplersonographie teilzunehmen, wurde die Telefonnummer bzw. E-Mail Adresse aufgenommen und so der Kontakt für die Nachfolgestudie hergestellt. Von den 30 Probanden der fMRT-Untersuchung, die noch nicht an der fTCD-Untersuchung im Jahre 2003 teilgenommen hatten (s. o.), gelang es, 8 weitere Probanden für die fTCD-Untersuchung zu gewinnen. Vergütung für die Teilnahme an der fTCD-Studie waren 6 €, Studierende der Psychologie konnten alternativ eine Bescheinigung über eine Versuchspersonenstunde erhalten.

3.2.1.2. Ausschlusskriterien

Für den zweiten Teil der fTCD-Datenerhebung wurden keine zusätzlichen Ausschlusskriterien erhoben, da sämtliche Teilnehmer bereits bei der fMRT-Untersuchung als geeignet klassifiziert wurden. Für die Teilnehmer der ersten Messung im Jahre 2003 galten die gleichen Ausschlusskriterien wie für die Probanden der fMRT-Messung (siehe Abschnitt 3.1.1.2.) Für jede Versuchsperson, unabhängig vom Zeitpunkt der Teilnahme an der fTCD-Studie, musste allerdings eine optimale Ableitung des TCD-Signals gewährleistet sein (siehe Abschnitt 2.3.1.).

3.2.1.3. Zusammensetzung der Stichprobe

Insgesamt (Zeitpunkte 1 und 2) nahmen an der fTCD-Untersuchung $N = 27$ Studierende verschiedener Fakultäten der Universität Bielefeld teil. $N = 16$ Versuchspersonen nahmen sowohl an der fTCD- als auch an der fMRT-Untersuchung teil. Insgesamt betrug der Altersdurchschnitt der Probanden $M = 28.04$ Jahre ($SD = 5.84$ Jahre), nur zwei von ihnen waren älter als 40 Jahre. In der Gruppe der Versuchspersonen, die sowohl bei der fTCD- als auch bei der fMRT-Untersuchung teilgenommen hatten, betrug das Durchschnittsalter $M = 29.69$ Jahre ($SD = 6.51$ Jahre). Der Mittelwert des Lateralitätsquotienten (LQ) nach Erfassung der Händigkeit mit dem Edinburgh-Händigkeitsinventar (Oldfield, 1971) betrug für die Gesamtgruppe $LQ = + 87.70$ ($SD = 12.56$) und für die spezielle Substichprobe, der Versuchspersonen, die an beiden Untersuchungen teilgenommen hatten, $LQ = + 87.15$ ($SD = 11.68$). Insgesamt hatten nur drei Probanden einen Lateralitätsquotienten von weniger als + 70. Zur Erfassung der Händigkeit siehe Abschnitt 3.1.1.2 sowie Abbildung 25.

3.2.2. Versuchsdurchführung und Versuchsablauf

3.2.2.1. Ort der fTCD-Versuchsdurchführung

Ort der Experimentdurchführung war ein fensterloser, gegen Außengeräusche gut isolierter Untersuchungsraum in der Universität Bielefeld.

3.2.2.2. Apparaturen der fTCD-Studie

Die technische Ausstattung des Experiments bestand aus einem Personalcomputer (CPU: Pentium I, 133 MHz) und einem Dopplersonographiegerät (Multi-Dop™ 7.50 Apparatur, DWL Elektronische Systeme GmbH, Sipplingen; vgl. DWL-Bedienungsanleitung, 1995).

Für beide Bedingungen (Wort- und Reimgenerierung; siehe Abschnitt 3.2.3.2.) wurde zur Stimulusdarbietung das Programm „ShowPics“¹ (s. o.) verwendet. Die Leistung in den Generierungsphasen, gemessen über die Anzahl der Spacetastendrucke (siehe Abschnitt 3.2.3.2.), wurde von dem Versuchsleiter auf einem speziell dafür angefertigten Formular notiert (siehe Anhang XIV).

Der Computer für die Stimulusdarbietung war durch ein Markerübertragungskabel mit dem Dopplersonographiegerät verbunden. So war es möglich, dass zeitgleich mit der Präsentation eines jeden Stimulus ein Impuls als Zeitmarkierung auf die fTCD-Registrierung an das Dopplersonographiegerät übertragen wurde. Ohne Marker, die den Beginn einer neuen Epoche signalisieren, wäre eine statistische Auswertung mit dem Programm „AVERAGE Version: 1.85e“ (Deppe et al., 1997) nicht möglich.

Für Details zur Erfassung der Blutflussgeschwindigkeit mittels fTCD sei an dieser Stelle auf Abschnitt 3.2.4. verwiesen sowie auf die ausführlichen Beschreibungen in der Dissertation von Deppe („Funktionelle Transkranielle Doppler Sonographie - Methodik zu Erfassung ereignisbezogener Gehirnaktivitätsänderungen“ (Deppe, 2000; Deppe et al., 2004)).

3.2.2.3. Vorbereitung der Versuchsdurchführung

Vor Beginn jeder Untersuchung (zu beiden Zeitpunkten) wurden die Probanden gebeten, die beiden Fragebögen (siehe Anhang V sowie Abbildung 25) zur Erfassung biographischer Daten (Alter, Schulabschluss, Händigkeit etc.) und zu eventuell vorbestehenden neurologischen Erkrankungen auszufüllen. Auch die Teilnehmer der Gruppe, die bereits für die fMRT-Untersuchung diese Fragebögen ausgefüllt hatten, wurden gebeten, dies abermals zu tun, um so gegebenenfalls Veränderungen in der Handpräferenz oder möglicherweise erst kürzlich eingetretene Kopfverletzungen ausschließen zu können. Anschließend wurden die Versuchspersonen über die in der Studie verwendeten Geräte und über den Ablauf informiert. Wenn danach keine weiteren Fragen oder Zweifel von Seiten der Probanden bestanden, wurde die Kopfhalterung des fTCD-Geräts angebracht (siehe Abschnitt 2.3.1. und Abbildung 6). Nach der Fixierung der Halterung wurden die Sonden so ausgerichtet, dass sich eine optimale Ableitung einstellte, die durch ein gut hörbares, pulsierendes Strömungsgeräusch und durch eine deutlich zu erkennende, farblich abgestufte Visualisierung des Blutflusses auf dem fTCD-Display zu erkennen war (siehe Abbildung 7). Nachdem dies geschehen war, bekamen die Versuchspersonen in abwechselnder Reihenfolge eine der beiden Instruktionen (siehe Anhang XV-XVI) vorgelegt und bekamen anschließend nochmals die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Während des Experimentes saß der Proband an einem Tisch, auf dem beide zur Durchführung der Untersuchung verwendeten Geräte positioniert waren. Der Versuchsleiter saß während des Experiments links neben dem Probanden und notierte sämtliche Äußerungen und Tastendrucke der Versuchsperson auf einem speziell dafür angefertigten Handzettel (s. o.). Neben dem Computer für die Stimulusdarbietung, in der Mitte des Tisches, befand sich das Dopplersonographiegerät, dessen Bildschirm während der Untersuchung zugeklappt wurde, um die Probanden nicht unnötig abzulenken. Aus dem gleichen Zweck wurde auch das pulsierende Strömungsgeräusch während der Untersuchung abgeschaltet.

3.2.3. Stimulusmaterial und Aufgabenstellung

3.2.3.1. Aufgabenstellung und Art der Reizdarbietung

Die Untersuchung bestand aus zwei 20-minütigen Aufgaben, einer Reimgenerierungs- und einer Wortgenerierungsaufgabe. Nach der Odd-Even Methode wurden die

Versuchspersonen auf die beiden Bedingungen, erst Reim- und dann Wortgenerierung oder umgekehrt, aufgeteilt. Dies geschah, um mögliche Reihenfolgeeffekte durch nachlassende Konzentration ausgleichen zu können.

3.2.3.2. Instruktion

Die Instruktion für die Wortgenerierungsaufgabe wurde von der Arbeit von Chen übernommen (Chen, 2004; Krach, Chen, & Hartje, 2006). Um beide Untersuchungsbedingungen möglichst vergleichbar zu gestalten, wurde die Instruktion der Reimgenerierungsaufgabe derjenigen der Wortgenerierungsaufgabe bestmöglich angeglichen (siehe Anhang XV-XVI). Bei der fTCD-Untersuchung wurde auf die Wort- und Reimentscheidungsaufgaben, die ein Bestandteil der fMRT-Studie waren, verzichtet, da hierbei lediglich Hemisphärenunterschiede und nicht eine mögliche Interaktion (s. o.) von Interesse waren.

3.2.3.2.1. Wortgenerierung

Bei der Wortgenerierungsaufgabe sollten die Versuchspersonen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes so viele Wörter wie möglich nennen, die mit einem vorgegebenen Buchstaben beginnen (siehe Anhang XV). In dieser Untersuchung wurden die Versuchspersonen speziell dazu aufgefordert, nach Erscheinen eines Buchstabens auf dem Computerbildschirm (5 Sekunden nach Ertönen eines Warntons), *gedanklich* so viele passende Wörter wie möglich zu generieren. Dabei sollten die Probanden für jedes eingefallene Wort mit beiden Zeigefingern (s. o.) die Leertaste auf der vor ihnen liegenden Tastatur drücken. Erlaubt waren alle Wörter der deutschen Sprache, inklusive Eigennamen, identisch mit der Instruktion der fMRT-Studie (s. o.). Nach 17,5 Sekunden endete die Wortgenerierungsaufgabe mit einem doppelten Ton, und die Probanden sollten nun die gedanklich generierten Wörter laut aussprechen. Nach 5 Sekunden ertönte ein dreifacher Ton, woraufhin die Versuchspersonen mit dem Berichten von Wörtern aufhören sollten. Danach folgte eine Ruhephase von 32,5 Sekunden, in denen die Probanden angehalten waren, sich zu entspannen und nicht mehr gedanklich nach weiteren Wörtern zu suchen (Versuchsablauf siehe Abbildung 32).

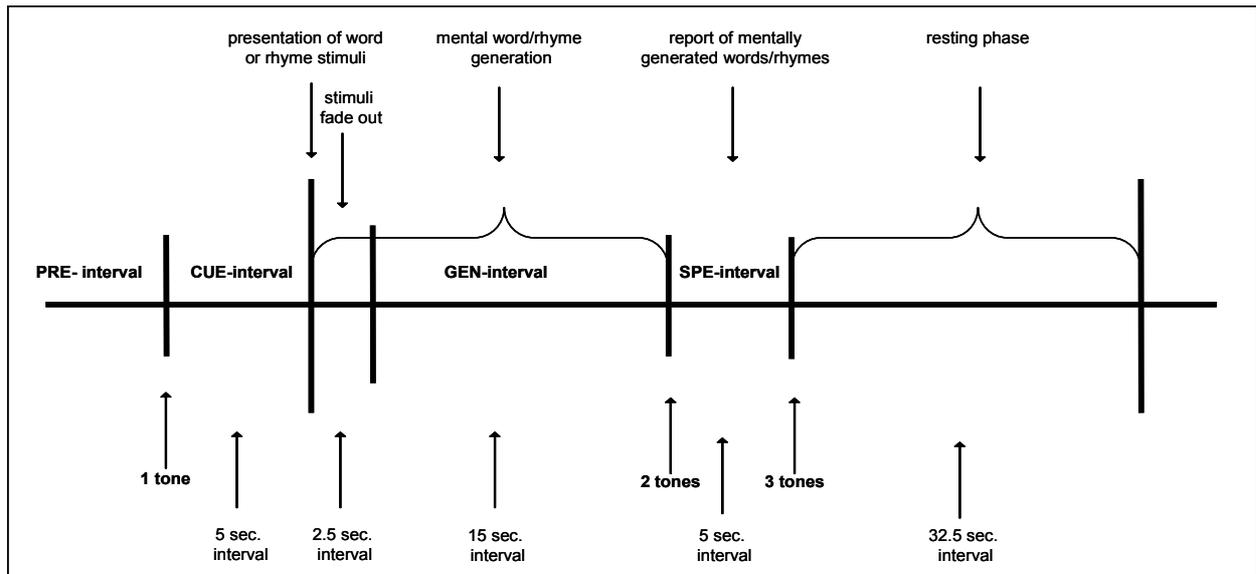


Abbildung 32: Versuchsablauf bei Wort- und Reimgenerierung (aus Krach & Hartje, 2006)

Dieser Versuchsablauf wiederholte sich mit 20 verschiedenen Buchstaben, die in randomisierter Form dargeboten wurden. Mit Ausnahme der Buchstaben Q, X und Y wurden bei jeder Versuchsperson zufällig 20 der restlichen 23 Buchstaben des lateinischen Alphabets ausgewählt. Der Ablauf, inhaltlich sowie zeitlich, war identisch mit dem Vorgehen vorheriger Arbeiten zu demselben Themenbereich (Knecht, Deppe et al., 2000; Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998; Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998; Knecht, Drager et al., 2000; Krach et al., 2006; Krach & Hartje, 2006).

3.2.3.2.2. Reimgenerierung

Das Vorgehen bei der Reimgenerierungsaufgabe ist dem der Wortgenerierungsaufgabe sehr ähnlich (siehe Anhang XVI). Die Probanden sollten hierbei versuchen, Wörter zu finden, die sich auf ein auf dem Computerbildschirm dargebotenes Nonsens-Triggerwort reimen (siehe auch fMRT-Studie). Triggerwörter waren in dieser Untersuchung, wie auch bei der fMRT-Studie, vierletterige Pseudowörter. Erlaubte Reimwörter waren alle Wörter des deutschen Sprachgebrauchs, in allen Konjugationen und Schreibweisen (s. o.).

Der zeitliche Ablauf der Reimgenerierungsaufgabe war identisch mit dem der Wortgenerierungsaufgabe, was eine exakte Vergleichbarkeit der Aufgaben bzw. deren Ergebnisse ermöglichte. Die 20 aus einer Vorstudie ausgewählten Reimtriggerwörter

wurden in randomisierter Reihenfolge einmalig dargeboten (Krach, 2004). Für die Gruppe der Teilnehmer zum zweiten Messzeitpunkt (Teilnehmer der fMRT-Studie) wurden fünf neue Reimtriggerwörter verwendet und gegen die fünf „schlechtesten“ Reimtriggerwörter des ersten Messzeitpunktes ausgetauscht (siehe Tabelle 11; „neu“). Als „schlechte“ Reimtriggerwörter wurden diejenigen Wörter bezeichnet, bei denen zum ersten Messzeitpunkt im Gruppenmittel am wenigsten passende bzw. sinnvolle Reime gefunden wurden.

Bei der Entwicklung der Reimtriggerwörter wurde darauf geachtet, dass vom Klang her keine Endung doppelt vorkam und alle Wörter eindeutig nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbar waren (s. o.). Weiterhin war es wichtig, dass sich die Schreibweise des Triggerwortstammes (siehe Tabelle 11) von der normalerweise üblichen Schreibweise von Wörtern der deutschen Sprache unterscheidet. So wurde gewährleistet, dass die Probanden beim Generieren der Reimwörter nur auf das Klangbild (die Phonologie) achteten und sich nicht von rein äußerlichen Merkmalen (dem Graphem) der Triggerwörter leiten ließen (siehe Abschnitt 3.1.3.2. sowie Tabelle 11).

Tabelle 11: Reimtriggerwörter der fTCD-Studie

<i>Trigger mit untypischem Wortstamm</i>	<i>Alternative Schreibweisen des Wortstammes</i>	<i>Beispiele für Reimwörter*</i>
TAYS	-eis, -ais, -eiß	Reis, Mais, heiß
LEUA	-euer, -äuer	Feuer, Gemäuer
FLUU	-uh, -u, -ou, -oo	Schuh, zu, Clou (frz.), Poo (engl.)
OITE	-eu-, -äu-	Heute, Bräute
LAIN	-ei-, -ai-	Wein, Main
LADD	-att, -adt, -d, -t	Watt, Stadt, Rad, Kat
HÄHR	-eer, -ehr, -är, -air, -er, -aire	Teer, sehr, Bär, fair, wer, Claire
WÄLL	-ell	hell

[Fortsetzung Tabelle 11]

Trigger mit untypischem Wortstamm	Alternative Schreibweisen des Wortstammes	Beispiele für Reimwörter*
AIER	-eier, -aier, -ayer, -eiher, -eyer	Leier, Maier, Bayer, Reiher, Schleyer
ZANT	-and, -ant, -andt	Land, Kant, angewandt
LÄUE	-eue, -äue	Treue, Säue
ZIIH	-ie, -ieh, -i	Knie, Vieh, Ski
POON	-ohn, -on, -oon	Sohn, schon, Roon
DAUV	-auf	Hinauf
KRAI	-ei, ai, ay	Brei, Kai, Makaay
SIHF	-ief	Tief
AKKE	-cke	Macke
PROI	-eu, -oy, -äu	Neu, Roy, Gebräu
LATN	-aten, -arten	Taten, warten
RAKS	-ax, -acks, -achs	Fax, Schlacks, Dachs
KIHR „neu“	-ihr, -eer, -ier, -ir	Ihr, Peer, Bier, wir,
PAIT „neu“	-aid, -eid, -eit	Maid, Neid, breit
ROHS „neu“	-oos, -oß	Moos, Schoß
INDD „neu“	-ind, -int, -indt	Kind, Mint, Lindt
PIDD „neu“	-it, -id, -itt	Fit, Kid, Ritt

Anmerkung: *alle Reimwörter wurden während der Untersuchung genannt

3.2.4. Auswertung der funktionellen TCD-Daten

3.2.4.1. Transformation der Rohdaten in ASCII-Format

Um mit den gespeicherten Rohdaten (*.tma-Format) der fTCD-Messung rechnen zu können, muss zuerst eine Umwandlung der Blutflussdaten in ASCII-Format (*.asc)

durchgeführt werden. Hierbei erhält man lange Zahlenreihen, bei denen die Blutflusswerte jeder Hemisphäre sowie die gesetzten Marker pro Epoche in unterschiedlichen Reihen abgetragen sind (siehe Anhang XVII). Anhand dieser Datenreihen wird anschließend mit dem Software-Programm „AVERAGE“ gerechnet (Deppe et al., 1997). Die hohe zeitliche Auflösung der fTCD wird dadurch ermöglicht, dass die Blutflussdaten mit einer Frequenz (Samplerate) von 28,7 Hertz (= 28,7 Messwerte pro Sekunde bzw. alle 0.035 s ein Messwert) aufgezeichnet werden.

3.2.4.2. Verwendete Filtereinstellungen

Um die Epochen um unphysiologische Blutflusswerte (Artefakte) zu bereinigen, wird vor dem Mittelungsprozess ein Min-Max-Filter eingestellt. Derartige Artefakte können durch Sprechen, durch Verschieben der Ultraschallsonden oder durch zu starke Kopfbewegungen während der Aufzeichnung entstehen. Liegt ein Messwert außerhalb der im Min-Max-Filter festgelegten Grenzen, werden die betreffenden Epochen als fehlerbehaftet eingestuft und eliminiert. Vor dem Mittelungsprozess wurden verschiedene sinnvolle Min-Max-Filtereinstellungen getestet, um eine brauchbare Anzahl an gültigen Epochen gewährleisten zu können. Bezüglich der Ergebnisse wurden keine signifikanten Unterschiede unter Verwendung der verschiedenen Filter gefunden, so dass es gerechtfertigt erschien, den Filter mit den großzügigsten Epocheneinschlusskriterien auszuwählen (HeartBeat 2.2/0.3; siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: *Verwendete Filtereinstellungen (fTCD)*

<i>Channel</i>	<i>Upper filter value</i>	<i>Lower filter value</i>
VI ¹⁰	150	60
Vr	150	60
ABP	off	off
CO2	off	off
HeartBeat	2.2	0.3
HcMrk	off	off
VI-Vr	20	-20

¹⁰ VI und Vr = velocity left / right

Die maximal mögliche Anzahl an gültigen Epochen pro Person und Bedingung ist 20. In der Gesamtgruppe war die durchschnittliche Anzahl an gültigen Epochen pro Person für die Reimgenerierungsaufgabe $M = 17.4$ und für die Wortgenerierungsaufgabe $M = 17.8$.

3.2.4.3. Period-of-Interest Analysen (POI)

Nachdem weitere Transformationen durchgeführt wurden (Deppe et al., 2004), kommt es anschließend zur statistischen Analyse der Blutflussdaten. Das Prinzip der an den Blutflussdaten durchgeführten Auswertung ist die Mittelung (Averaging; vgl. (Deppe et al., 2004)) von ereigniskorrelierten, zeitlich kontinuierlichen fTCD-Signalen (Aaslid, 1987). Zentral für die Analyse der ereigniskorrelierten Veränderungen des Blutflusses ist die Festlegung der Epochen anhand der automatisch gesetzten Marker (siehe Abbildung 33). Der Marker wird jedes Mal zum Zeitpunkt des ersten Tonsignals gesetzt, 5 Sekunden vor Erscheinen des Stimulus. Der Zeitpunkt der Stimulusdarbietung bzw. des Triggers wird als Nullpunkt der Epoche festgelegt. Alle Datenpunkte, die vor dem Nullpunkt gelegen sind, erhalten ein negatives Vorzeichen, alle nach dem Nullpunkt gelegenen Werte ein positives. Jede Epoche besteht aus vier Intervallen, einem Pretrigger-Intervall (Beginn bei -17.00 sec, Ende bei 0.00 sec), einem Cue-Intervall (Beginn bei -2.00 sec, Ende bei 7.00 sec), einem Generierungs-Intervall (Beginn bei 8.00 sec, Ende bei 18.00 sec) und einem Speak-Intervall (Beginn bei 22.50 sec, Ende bei 34.50 sec) (siehe Abbildung 33), den sog. *Periods-of-Interest (POIs)*. Die Zeitintervalle für die einzelnen POIs wurden aus der Arbeit von Deppe und Kollegen (2004) übernommen. Um spontane Blutflussveränderungen zu eliminieren, wird zusätzlich zur Normalisierung eine so genannte Baseline-Korrektur vorgenommen. Hierbei wird der Mittelwert des Baseline-Intervalls (-15.00 sec bis -4.00 sec) von jeder korrespondierenden Epoche subtrahiert. Alle Blutflusswerte einer Epoche werden immer als relative Veränderung der CBFV zum Mittelwert des Baseline-Intervalls angegeben.

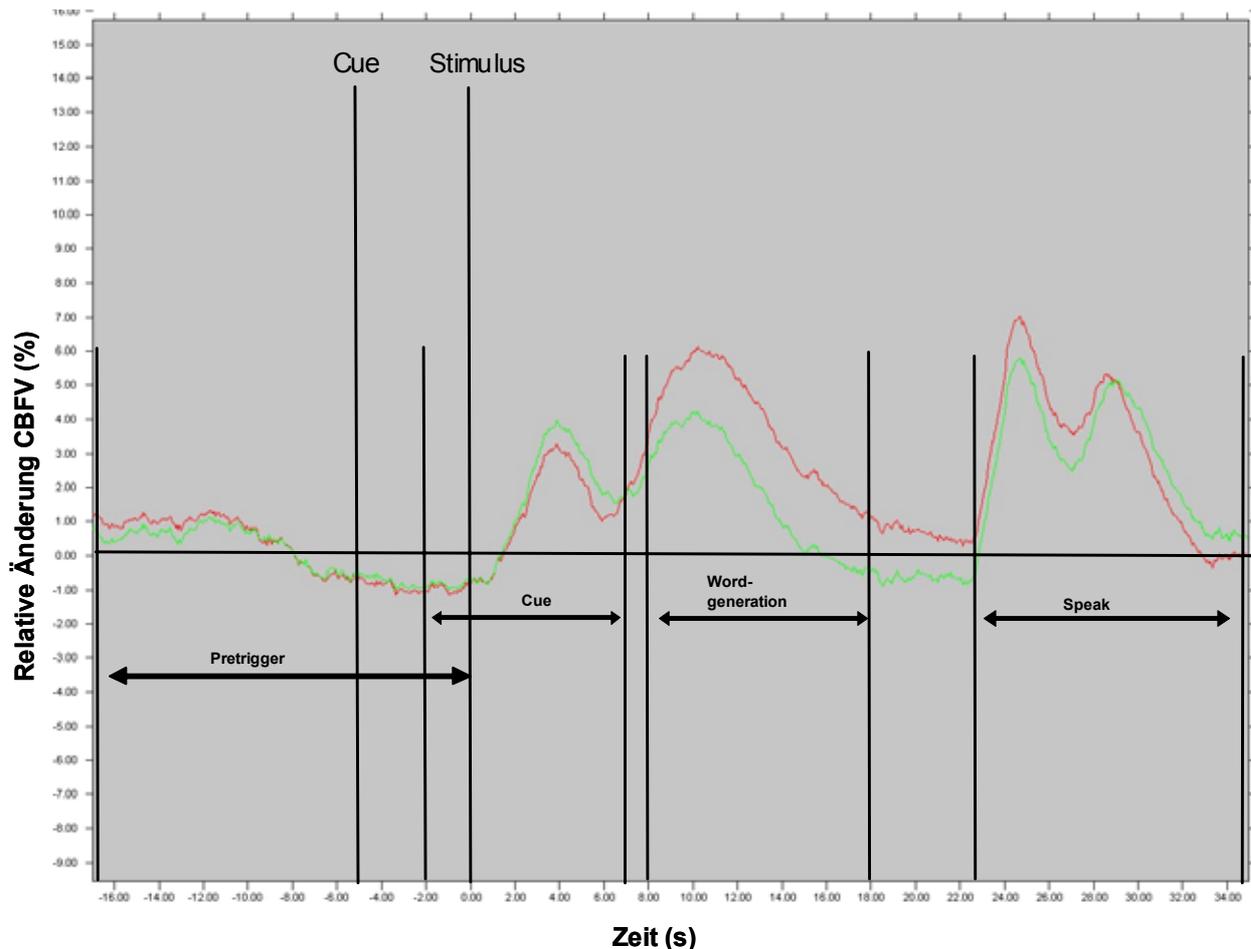


Abbildung 33: Lage der Auswertungsintervalle für die Datenreduktion (Periods-of-Interest [POIs])

3.2.4.4. Auswertung der funktionellen TCD-Daten zur Ermittlung eines Lateralitätsindex (fTCD-LI)

Anschließend an die Vorverarbeitung der Daten wurden, mittels in der AVERAGE-Software integriertem Wilcoxon-Test, nichtparametrische Signifikanztests zur Prüfung der Unterschiede zwischen den Durchblutungsgeschwindigkeiten beider Hemisphären für alle Zeitpunkte t_k der Epoche durchgeführt. Nur Intervalle, bei denen der Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < .05$ signifikant wurde und mit einer Länge von über einer Sekunde, wurden als funktionelle Hemisphärendominanz eingestuft.

Zur Errechnung der tatsächlichen Blutflussveränderungen (Lateralitätsindex und Aktivierungsindex) wird schließlich die Datenreduktionsanalyse (Data Reduction Analysis) durchgeführt. Hierbei wird separat für jedes definierte Intervall (PRE-, CUE-, GEN- und

SPE-Intervall, siehe Abschnitt 3.2.4.3. sowie Abbildung 33) die mittlere prozentuale Blutflussveränderung in der linken und rechten MCA (VI bzw. Vr) zum Baseline-Intervall, der mittlere Aktivierungsindex sowie der fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) errechnet. Der fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) ist definiert als die gemittelte Differenz des Blutflusses zwischen beiden Hemisphären während des Intervalls T_{int} (2 Sekunden Intervall um T_{max}) (siehe Abbildung 34).

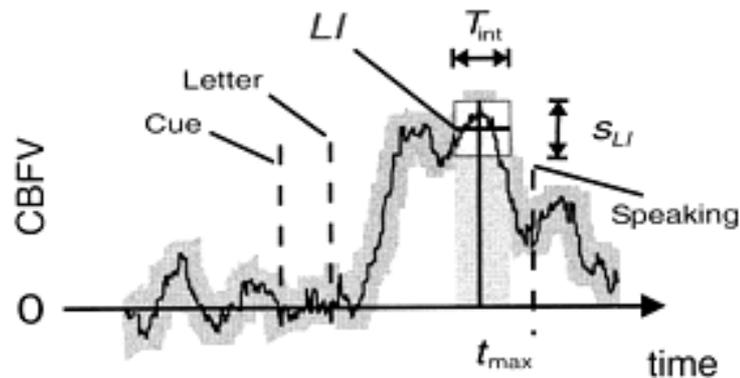


Abbildung 34: Intervall T_{int} (2 Sekunden Intervall um T_{max}) (Knecht, Deppe, Ringelstein et al., 1998)

Positive Werte zeigen dabei eine Dominanz der linken, negative eine Dominanz der rechten Hemisphäre im korrespondierenden Intervall an. Der mittlere Aktivierungsindex (fTCD-AI) bezeichnet die über beide Hemisphären (VI und Vr) gemittelte prozentuale Zunahme bzw. Abnahme der Durchblutungsgeschwindigkeit während der Intervalle. Ein positiver Wert steht hierbei für eine (über beide Hemisphären gemittelte) Zunahme der Blutflussgeschwindigkeit, ein negativer Wert respektive für eine (über beide Hemisphären gemittelte) Abnahme an zerebraler Blutflussgeschwindigkeit.

4. ERGEBNISSE

Der Ergebnisteil gliedert sich in drei Abschnitte. Zuerst werden die Leistungsaspekte und physiologischen Messwerte der fMRT-Studie beschrieben. Anschließend folgt die Darstellung der Leistungsparameter, die während der fTCD-Messung registriert wurden, sowie die mittels funktioneller transkranieller Dopplersonographie gewonnenen physiologischen Daten. Im dritten Abschnitt wird ein Vergleich der mit unterschiedlichen Methoden gewonnenen Daten in einer Substichprobe von Probanden vorgenommen.

4.1. Ergebnisse der funktionellen MRT in der Gesamtgruppe

Im Folgenden werden die Daten der 33 Versuchspersonen analysiert, die nach den in Abschnitt 3.1.1. beschriebenen Selektionskriterien ausgewählt wurden. Der erste Teil umfasst die reinen Leistungsergebnisse (siehe Abschnitt 4.1.1.). Nachfolgend werden die Ergebnisse der funktionellen Bildgebung (fMRT-Daten), untergliedert in Einzel- und Gruppenanalyse sowie Aktivierungs- und Lateralitätsdaten, vorgestellt (siehe Abschnitt 4.1.2.).

4.1.1. Leistungsaspekte (fMRT)

4.1.1.1. Analyse der Leistung geordnet nach Versuchspersonen

Abbildung 35 zeigt die gemittelte Anzahl der Tastendrucke während der Messung, aufgeschlüsselt nach Versuchspersonen ($N = 30$, siehe Abschnitt 3.1.2.7.). Die Anzahl der mental generierten Wörter in der Wortgenerierungsbedingung ($M = 8.96$; $Min = 5.83$; $Max = 14.92$) unterscheidet sich dabei signifikant von der Anzahl der mental generierten Wörter in der Reimgenerierungsbedingung ($M = 5.19$; $Min = 3.17$; $Max = 9.83$) (t -Test für abhängige Stichproben: $t = 16.07$, $p < .0001$). Nur eine Versuchsperson (Vp 30) liegt in der Anzahl mental generierter Wörter/Reime mehr als zwei

Standardabweichungen ($SD_{WG} = 2.00$; $SD_{RG} = 1.34$) entfernt vom Mittelwert der Gesamtgruppe (siehe Abbildung 35).

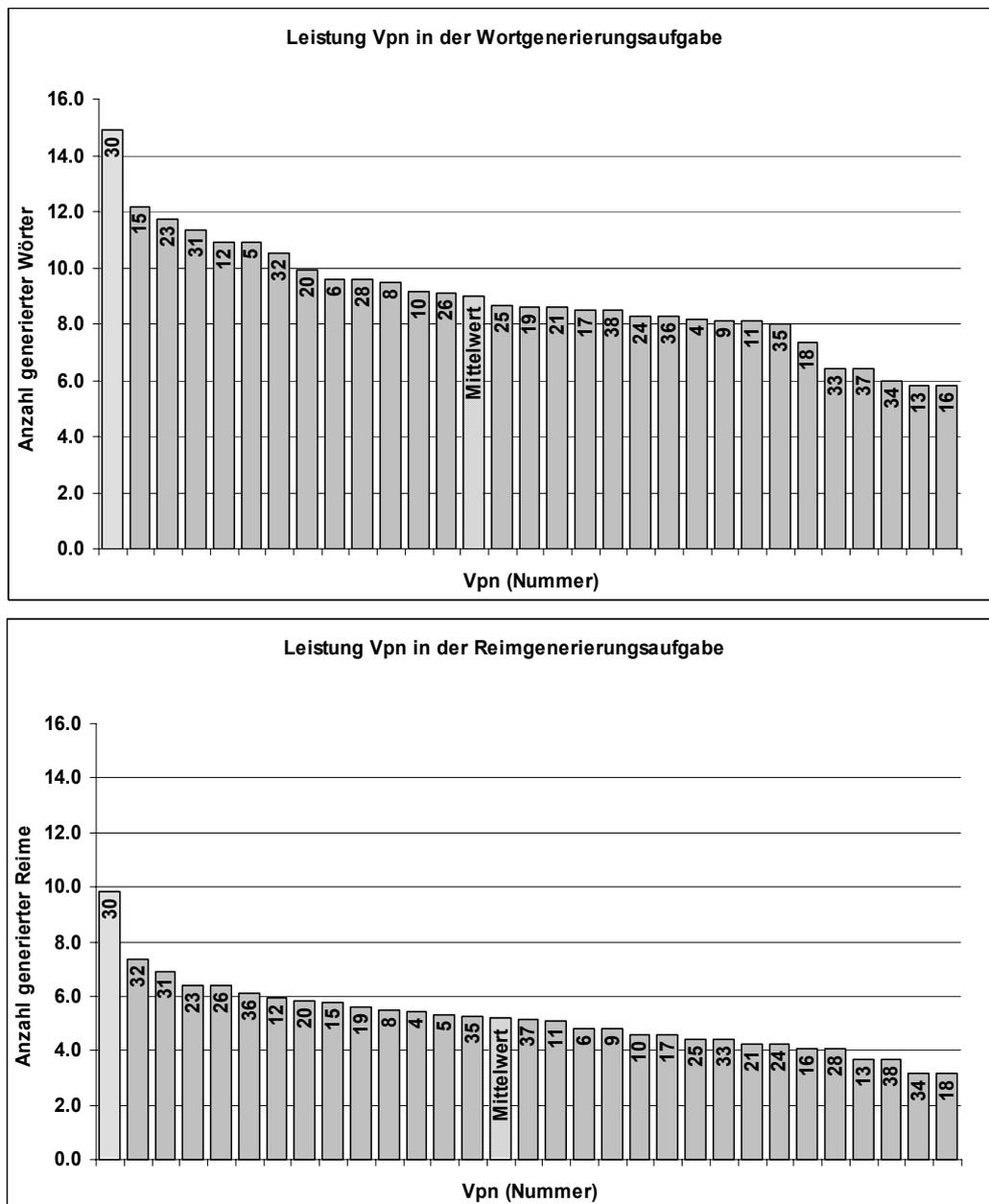


Abbildung 35: Anzahl mental generierter Wörter/Reime pro Versuchsperson während der Wort- und Reimgenerierung

Auch die Anzahl richtiger Antworten (siehe Abschnitt 3.1.3.2.) in der Wortentscheidungsbedingung ($M = 4.77$; $Min = 4.25$; $Max = 5.00$) liegt signifikant höher als in der Reimentscheidungsaufgabe ($M = 4.67$; $Min = 4.33$; $Max = 4.92$) (t -Test für abhängige Stichproben: $t = 2.22$, $p = .035$).

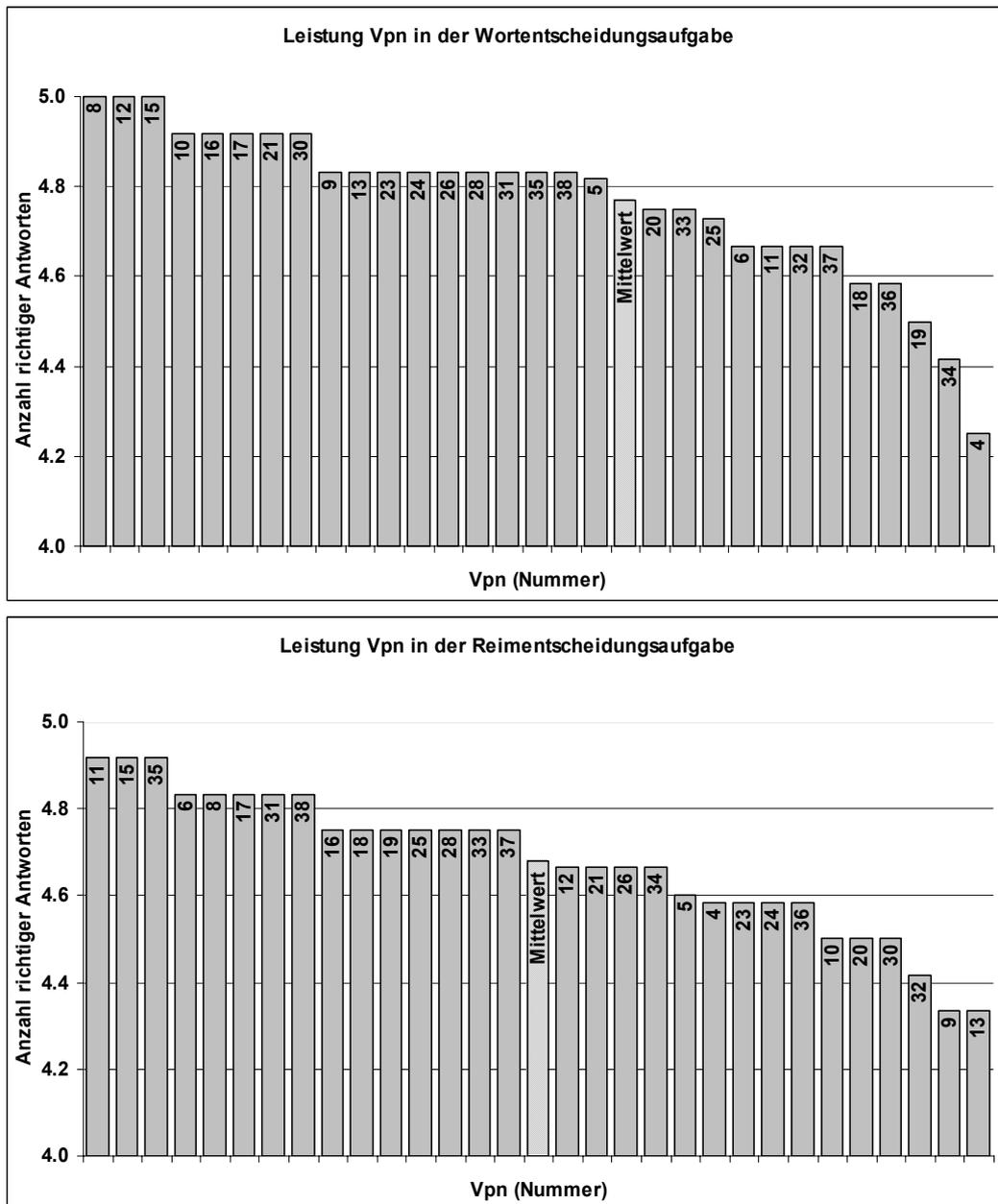


Abbildung 36: Anzahl richtiger Antworten pro Versuchsperson während der Wort- und Reimentscheidung

4.1.1.2. Analyse der Leistung geordnet nach Buchstaben und Reimwörtern

Abbildung 37 zeigt die gemittelte Anzahl der Tastendrucke während der Messung aufgeschlüsselt nach Stimuli (Wortgenerierung: *Range* = 1.40; *Min* = 8.27; *Max* = 9.67 und Reimgenerierung: *Range* = 3.14; *Min* = 4.43; *Max* = 7.57). Dabei ist die Verteilung

der Mittelwerte der generierten Wörter pro Buchstabe deutlich ausgeglichener als die Verteilung der Mittelwerte der generierten Reime pro Reimtriggerwort (siehe *Range*).

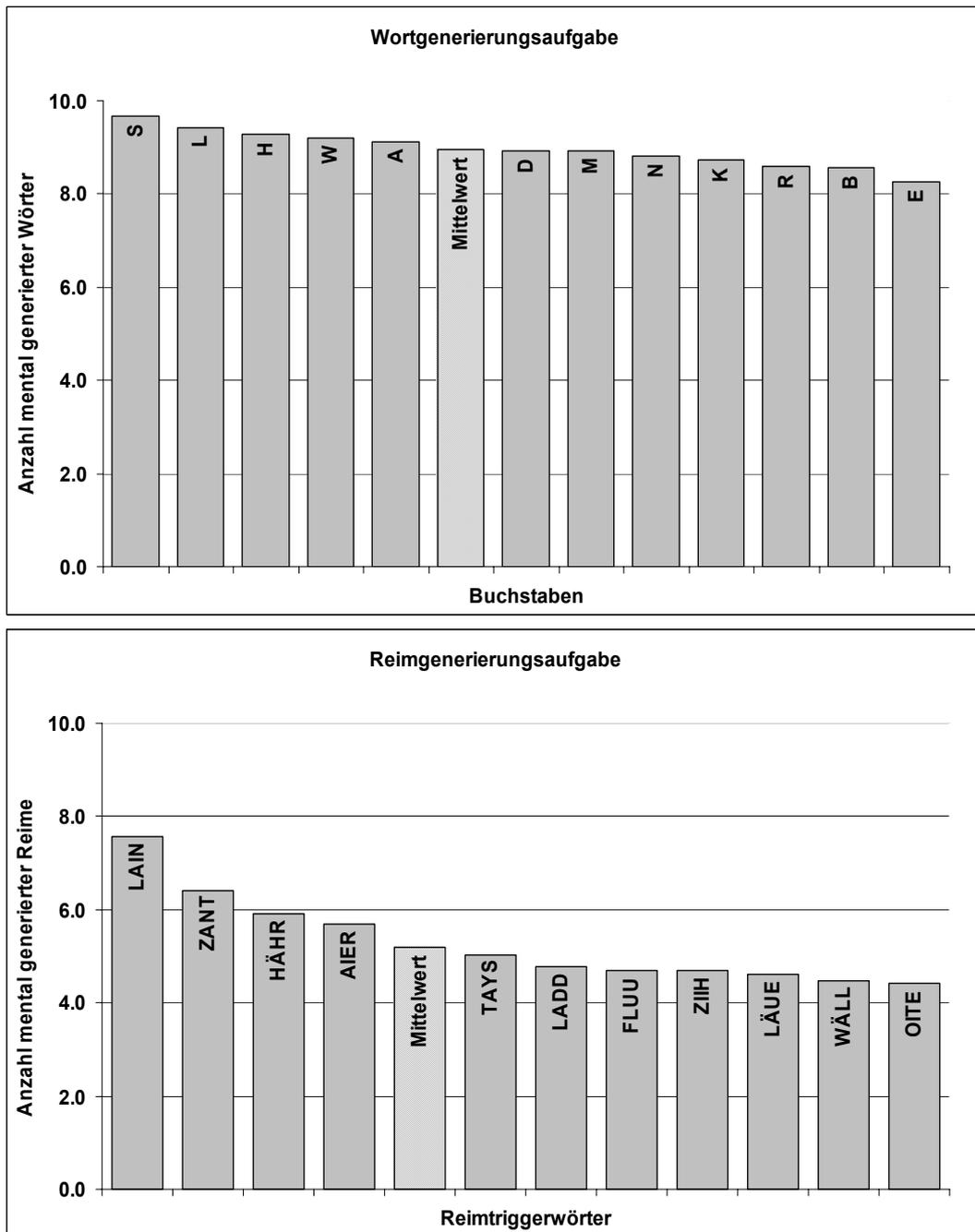


Abbildung 37: Anzahl der Tastendrucke pro Aufgabenbedingung (Wort- und Reimgenerierung)

4.1.2. Physiologische Messwerte (fMRT)

4.1.2.1. fMRT-Aktivierungen auf Versuchspersonenebene

Im folgenden Abschnitt werden die fMRT-Aktivierungen unter der Wort- und Reimgenerierungsbedingung für jede Versuchsperson unter individuell angepassten t -Schwellenwerten dargestellt (für individuelle Aktivierungswerte der 33 Probanden siehe Anhang XVIII-XIX).

4.1.2.1.1. Physiologische Aktivierung bei der Wortgenerierung

Bei der Betrachtung der Aktivierungsmuster für die Wortgenerierungsaufgabe auf Versuchspersonenebene zeigt sich bei jeder Versuchsperson eine deutliche Aktivierung in den linkshemisphärischen, sprachassoziierten Arealen (u. a. inferior-frontaler Kortex, Insula, präzentraler Kortex, mittlerer/medialer frontaler Gyrus (für individuelle Aktivierungswerte der 33 Probanden siehe Anhang XVIII)). Die deutlichste und konstanteste Aktivierung liegt im linkshemisphärischen inferior-frontalen Kortex (BA 44/45 oder 47) und findet sich bei 31 von 33 Probanden (94%) (siehe Tabelle 13). Eine signifikante Aktivierung der homologen Areale in der rechten Hemisphäre zeigt sich bei 60% der Probanden (siehe Tabelle 14). Innerhalb des linkshemisphärischen inferior-frontalen Kortex liegt die stärkste Aktivierung im inferior-frontalen opercularen Bereich (73%) (siehe Tabelle 13). Im rechtshemisphärischen homologen Gebiet ist dagegen eine leichte Überlegenheit im inferior-frontalen orbitalen Bereich (42%) zu erkennen (siehe Tabelle 14). Eine zusätzliche signifikante linkshemisphärische Aktivierung findet sich bei 67% der Versuchspersonen in der Insula-Region (siehe Tabelle 13). Weitere häufig aktivierte linkshemisphärische Gebiete umfassen den präzentralen Kortex (52%), den superioren temporalen Pol (52%), den MFG (45%) sowie die rolandisch-operculare Region (39%).

Rechtshemisphärische Aktivierungen in homologen Arealen treten deutlich seltener auf: Insula (48%), präzentraler Kortex (21%), superiorer temporaler Pol (33%), MFG (27%) sowie rolandisch-operculare Region (6%).

Tabelle 13: Linkshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Wortgenerierung (Kontrast 1)

Vp	t-Wert	Inf F				Pre-central	Sup Tem		Roland		MF	SF
		Tri	Orb	Oper	Insula		Pole	MFG	SFG	Oper	Orb	Orb
1	t > 4.97	x	x	x	x		x			x		
2	t > 5.06	x	x		x				x			
3	t > 5.40	x		x	x	x			x			
4	t > 5.09		x				x					
5	t > 5.86	x		x	x	x	x	x				
6	t > 5.06			x		x			x			
8	t > 5.05		x	x	x		x					
9	t > 5.09		x				x					
10	t > 5.02			x	x	x						
11	t > 3.75	x	x	x			x			x		
12	t > 5.36	x		x		x			x			
13	t > 5.05		x		x	x						
15	t > 5.07									x		
16	t > 5.83	x	x	x	x					x	x	
17	t > 5.84	x	x		x	x	x	x		x		
18	t > 5.41		x	x			x			x		
19	t > 3.75				x				x			
20	t > 5.04	x	x	x	x		x	x		x		
21	t > 4.95			x			x					
23	t > 3.11	x		x	x		x			x		
24	t > 3.11	x		x		x	x	x				
25	t > 5.40	x	x		x	x	x			x		
26	t > 5.84			x	x	x	x	x	x	x		
28	t > 3.11	x		x	x	x			x			
30	t > 5.05			x	x					x		
31	t > 5.84		x	x	x	x	x	x				
32	t > 5.83	x		x	x	x				x		
33	t > 5.84		x		x		x					
34	t > 5.04	x		x					x		x	
35	t > 5.83	x	x	x	x	x						

[Fortsetzung Tabelle 13]

Vp	t-Wert	Inf F	Inf F	Inf F	Pre-	Sup Tem	Roland	MF	SF		
		Tri	Orb	Oper		Insula		central	Pole	MFG	SFG
36	$t > 5.82$	x	x	x		x					
37	$t > 5.40$	x	x		x	x		x			
38	$t > 5.83$	x	x	x	x	x	x	x			
Σ		19	18	24	22	17	17	15	1	13	1
%			94%		67%	52%	52%	45%	3%	39%	3%

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Vp = Versuchsperson

Eine Überlegenheit einer rechtshemisphärischen Region im Vergleich zu einer links-hemisphärischen zeigt sich allein für den superior-frontalen Kortex (12% vs. 3%).

Bei diesen Vergleichen ist unter methodischen Gesichtspunkten folgendes anzumerken: Die Schwellenwerte für eine signifikante Aktivierung liegen zwischen $t > 3.11$ und $t > 5.86$, jeweils in Abhängigkeit vom Aktivierungsniveau der Probanden. Nur Cluster mit mindestens $N = 10$ zusammenhängenden Voxels ($p < .001$ bei $t > 5.86$ bis $p < .20$ bei $t > 3.11$) wurden in die statistische Auswertung miteinbezogen. Nur Cluster, die in frontalen Regionen (y -Koordinate ≥ 0) lagen, wurden in die Analyse mit aufgenommen (siehe Abschnitt 3.1.4.5.1). Bei der Dokumentation der an den Sprachprozessen beteiligten Hirnareale wurden alle Regionen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von $> 10\%$ bei einem „local maximum radius = 10 mm“ (laut „automated anatomic labeling/aal-atlas“; s. o.) zum Aktivierungscluster gehörten, ausgewählt.

Tabelle 14: Rechtshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Wortgenerierung (Kontrast 1)

Vp	t-Wert	Inf F	Inf F	Inf F	Pre-	Sup Tem	Roland	MF	SF	
		Tri	Orb	Oper		Insula		central	Pole	MFG
1	$t > 4.97$	x		x	x		x			
2	$t > 5.06$									
3	$t > 5.40$				x	x				
4	$t > 5.09$						x			

[Fortsetzung Tabelle 14]

Vp	t-Wert	Inf F Tri	Inf F Orb	Inf F Oper	Insula	Pre- central	Sup Tem Pole	MFG	SFG	Roland Oper	MF Orb	SF Orb
5	t > 5.86		x								x	
6	t > 5.06			x		x		x				
8	t > 5.05											
9	t > 5.09						x					
10	t > 5.02	x	x	x	x		x			x		
11	t > 3.75	x	x	x	x							
12	t > 5.36											
13	t > 5.05											
15	t > 5.07				x							
16	t > 5.83	x	x	x			x	x		x		
17	t > 5.84		x		x	x	x	x				
18	t > 5.41											
19	t > 3.75	x			x							
20	t > 5.04		x		x						x	
21	t > 4.95											
23	t > 3.11											
24	t > 3.11						x					
25	t > 5.40	x	x		x							
26	t > 5.84	x	x	x	x		x	x				
28	t > 3.11	x	x	x	x	x		x				
30	t > 5.05	x			x							
31	t > 5.84		x		x		x	x	x			
32	t > 5.83			x	x	x		x	x			
33	t > 5.84		x		x		x					
34	t > 5.04											
35	t > 5.83		x	x	x	x						
36	t > 5.82	x	x	x		x		x	x		x	x
37	t > 5.40		x				x	x	x			
38	t > 5.83	x										
Σ		11	14	10	16	7	11	9	4	2	3	1
%			60%		49%	21%	33%	27%	12%	6%	9%	3%

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Vp = Versuchsperson

4.1.2.1.2. Physiologische Aktivierung bei der Reimgenerierung

Ähnlich wie bei der Wortgenerierungsaufgabe findet sich auch bei der Reimgenerierungsaufgabe bei jeder Versuchsperson eine deutliche und stabile Aktivierung der linkshemisphärischen, sprachassoziierten Regionen (siehe Abschnitt 4.1.2.1.1. sowie Tabelle 15). Auch bei der Reimgenerierung liegt die deutlichste Aktivierung im inferior-frontalen Kortex (BA 44/45 und 47) und zeigt sich bei 32 von 33 Probanden (97%) (für individuelle Aktivierungswerte der 33 Probanden siehe Anhang XIX). Im Unterschied zur Wortgenerierungsaufgabe findet sich eine Aktivierung in der homologen Region der rechten Hemisphäre jedoch deutlich häufiger (88%) (siehe Tabelle 16). Auch bei der Reimgenerierung zeigt sich, dass die inferior-frontale operculare Region am stärksten an der Aktivierung des linkshemisphärischen inferior-frontalen Kortex (88%) beteiligt ist. In der rechten Hemisphäre ist dagegen der orbitale Kortex die am stärksten aktivierte Teilregion des inferior-frontalen Kortex (58%) (siehe Tabelle 16). Weitere mit der Wortgenerierungsaufgabe vergleichbar stark auftretende linkshemisphärische Aktivierungen umfassen die Insula (73%), den präzentralen Kortex (55%), den superioren temporalen Pol (58%) sowie die rolandisch-operculare Region (24%). Deutlich häufiger als bei der Wortgenerierungsbedingung liegt eine Aktivierung des MFG (73%) vor.

Tabelle 15: Linkshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Reimgenerierung (Kontrast 2)

Vp	t-Wert	Inf F			Pre- central	Sup Tem		Roland Oper	MF Orb	SF Orb
		Tri	Orb	Oper		Pole	MFG			
1	t > 4.97		x	x				x		
2	t > 5.06	x	x		x		x	x		
3	t > 5.40	x		x	x	x		x		
4	t > 5.09	x	x	x			x	x		
5	t > 5.86	x		x	x		x	x		
6	t > 5.06	x	x	x		x		x		
8	t > 5.05		x	x	x		x			x
9	t > 5.09	x	x	x			x	x		
10	t > 5.02			x	x	x	x	x	x	
11	t > 5.01	x	x	x	x		x		x	
12	t > 5.36	x	x	x	x	x	x	x		
13	t > 5.05		x		x	x		x		

[Fortsetzung Tabelle 15]

Vp	t-Wert	Inf F			Pre- central	Sup Tem			Roland		MF	SF
		Tri	Orb	Oper		Insula	Pole	MFG	SFG	Oper	Orb	Orb
15	t > 5.07				x					x		
16	t > 5.83	x	x	x	x	x		x		x	x	
17	t > 5.84		x	x	x		x	x				
18	t > 5.41			x	x		x			x		
19	t > 3.75	x		x	x	x		x				
20	t > 5.04	x		x	x	x	x	x				
21	t > 4.95	x	x	x			x	x				
23	t > 3.11	x		x	x	x	x			x		
24	t > 3.11	x	x	x			x	x		x	x	x
25	t > 5.40	x	x	x	x	x		x				
26	t > 5.84		x	x	x	x	x	x	x			
28	t > 3.11	x		x				x				
30	t > 5.05	x	x	x	x		x	x	x			
31	t > 5.84		x	x	x	x	x	x				
32	t > 5.83			x	x	x						
33	t > 5.84		x		x	x	x			x		
34	t > 4.31	x		x				x				
35	t > 5.83	x	x	x	x	x		x				
36	t > 5.82	x	x	x		x		x				
37	t > 5.40	x	x	x	x	x	x	x				
38	t > 5.83	x	x	x	x	x	x					
Σ		22	22	29	24	18	19	24	4	8	3	1
%			97%		73%	55%	58%	73%	12%	24%	9%	3%

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Vp = Versuchsperson

Rechtshemisphärische Aktivierungen kommen, mit Ausnahme der Aktivierung im MFG (55%), in ungefähr gleichem Ausmaß wie unter der Wortgenerierungsbedingung vor (Insula 52%, präzentraler Kortex 30%, superiorer temporaler Pol 39% sowie rolandisch-operculare Region 9%). Wie bei der Wortgenerierungsaufgabe ist einzig die Aktivierung im superior-frontalen Kortex stärker rechts- als linkshemisphärisch (18% vs. 12%) ausgeprägt. Ähnlich wie in Abschnitt 4.1.2.1.1. ist zu diesen Vergleichen unter methodischen Gesichtspunkten folgendes anzumerken:

Die Schwellenwerte für eine signifikante Aktivierung bei der Reimgenerierungsbedingung liegen, mit Ausnahme von zwei Probanden (Vpn 11 und 34), im gleichen

Bereich wie bei der Wortgenerierungsbedingung. Auch für die statistische Auswertung bei der Reimgenerierung wurden mindestens $N = 10$ zusammenhängende Voxels als minimale Clustergröße gewählt. Wiederum wurden nur die in frontalen Regionen (y -Koordinate ≥ 0) gelegenen Cluster in die Analyse mit aufgenommen. Bei der Dokumentation der an den Sprachprozessen beteiligten Hirnareale wurden alle Regionen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von $> 10\%$ bei einem „*local maximum radius = 10 mm*“ (laut „*automated anatomic labeling/aal-atlas*“; s. o.) zum Aktivierungscluster gehörten, ausgewählt s. o.).

Tabelle 16: *Rechtshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Reimgenerierung (Kontrast 2)*

Vp	t-Wert	Inf F				Pre- central	Sup Tem			Roland			MF Orb	SF Orb
		Tri	Orb	Oper	Insula		Pole	MFG	SFG	Oper				
1	$t > 4.97$	x			x									
2	$t > 5.06$		x					x	x					
3	$t > 5.40$					x								
4	$t > 5.09$			x				x	x					
5	$t > 5.86$	x	x	x	x				x				x	
6	$t > 5.06$			x		x			x	x				
8	$t > 5.05$		x											
9	$t > 5.09$	x		x		x		x	x		x			
10	$t > 5.02$			x	x	x		x			x			
11	$t > 5.01$	x	x	x	x			x	x					
12	$t > 5.36$		x											
13	$t > 5.05$	x	x		x	x								
15	$t > 5.07$		x	x				x	x		x			
16	$t > 5.83$	x	x		x			x	x					
17	$t > 5.84$		x		x			x	x	x				
18	$t > 5.41$													
19	$t > 3.75$	x	x	x	x				x					
20	$t > 5.04$		x	x	x	x		x	x					
21	$t > 4.95$												x	x
23	$t > 3.11$	x						x						
24	$t > 3.11$	x											x	
25	$t > 5.40$	x	x											
26	$t > 5.84$			x	x	x		x	x	x				
28	$t > 3.11$	x												
30	$t > 5.05$	x	x		x				x					

[Fortsetzung Tabelle 16]

Vp	t-Wert	Inf F	Inf F	Inf F	Pre- central	Sup Tem	MFG	SFG	Roland	MF	SF	
		Tri	Orb	Oper		Pole			Oper	Orb	Orb	
31	$t > 5.84$		x		x	x	x	x				
32	$t > 5.83$	x		x	x		x	x				
33	$t > 5.84$		x		x	x						
34	$t > 4.31$											
35	$t > 5.83$	x	x	x	x	x	x					
36	$t > 5.82$	x	x	x		x	x			x	x	
37	$t > 5.40$	x	x	x	x	x	x	x				
38	$t > 5.83$		x		x							
Σ		16	19	14	17	10	13	18	6	3	4	2
%			88%		52%	30%	13%	55%	18%	9%	12%	6%

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Vp = Versuchsperson

4.1.2.2. Region-of-Interest Analysen und Lateralitätsbestimmung auf Versuchspersonenebene

In diesem Abschnitt werden die individuellen Lateralitätsindizes, berechnet nach dem Fernández- und Voxelcount-Ansatz berichtet. Des Weiteren werden die Ergebnisse für unterschiedliche ROI-Radien (10 mm, 20 mm und 30 mm) sowie für verschiedene t -Schwellenwerte präsentiert.

4.1.2.2.1. Nach Fernández-Ansatz

Lateralitätsindizes bei der Wortgenerierungsaufgabe

Der Lateralitätsindex bei der Wortgenerierungsaufgabe, berechnet nach dem Fernández-Ansatz, liegt im Gruppenmittel für alle drei ROI-Radien (10 mm, 20 mm und 30 mm; siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) im positiven Bereich, d. h. die linke Hemisphäre ist in der entsprechenden Region-of-Interest im Durchschnitt stärker als die rechte Hemisphäre aktiviert ($M_{\text{Radius}10} = 0.13$, $\text{Range}_{\text{Radius}10}$: $\text{Min} = -0.24$, $\text{Max} = 0.54$; $M_{\text{Radius}20} = 0.16$, $\text{Range}_{\text{Radius}20}$: $\text{Min} = -0.24$, $\text{Max} = 0.45$; $M_{\text{Radius}30} = 0.15$, $\text{Range}_{\text{Radius}30}$: $\text{Min} = -0.14$, $\text{Max} = 0.41$). Die Versuchspersonen 15, 16, 19 und 25 haben über alle drei ROI-Radien hinweg negative Lateralitätsindizes, allerdings liegen nur bei Versuchsperson 19 alle drei Werte deutlich im negativen Bereich ($\text{fMRT-LI} \leq -0.10$).

Zwischen den drei Radien (s. o.) korrelieren die Lateralitätsindizes jeweils hoch signifikant miteinander ($r_{10/20} = .86, p < .001$; $r_{10/30} = .85, p < .001$; $r_{20/30} = .95, p < .001$).

Tabelle 17: *Individuelle Lateralitätsindizes nach Fernández für Kontrast 1 „Wortgenerierung minus Ruhe“ (ROI-Mittelpunkt: MNI-Koordinaten: -55 18 -5/Voxel-Koordinaten: 67.5 65.9 23.3; fMRT-LI < -.10 unterstrichen)*

	Radius 10 mm	Radius 20 mm	Radius 30 mm
VP1	<u>-0.14</u>	0.10	0.13
VP2	0.21	0.19	0.26
VP3	0.01	0.10	0.10
VP4	0.05	0.24	0.17
VP5	0.18	0.18	0.25
VP6	<u>-0.10</u>	-0.04	0.03
VP7	0.23	0.19	0.18
VP9	0.05	0.24	0.17
VP10	0.19	0.03	0.02
VP11	0.32	0.31	0.19
VP12	0.06	0.16	0.14
VP13	0.11	0.11	0.06
VP15	<u>-0.23</u>	-0.05	-0.06
VP16	-0.09	-0.03	-0.01
VP17	0.21	0.21	0.22
VP18	0.54	0.43	0.41
VP19	<u>-0.24</u>	<u>-0.24</u>	<u>-0.14</u>
VP20	0.08	0.02	-0.01
VP21	0.38	0.37	0.31
VP23	0.25	0.33	0.31
VP24	0.16	0.26	0.21
VP25	<u>-0.16</u>	-0.07	-0.06
VP26	0.22	0.22	0.21
VP28	0.21	0.16	0.13
VP30	0.12	0.14	0.12

[Fortsetzung Tabelle 17]

	Radius 10 mm	Radius 20 mm	Radius 30 mm
VP31	0.21	0.23	0.21
VP32	0.07	0.01	0.01
VP33	0.14	0.17	0.18
VP34	0.33	0.45	0.33
VP35	0.29	0.22	0.23
VP36	0.12	0.20	0.14
VP37	0.16	0.15	0.11
VP38	0.29	0.23	0.25
Mittelwert	0.13	0.16	0.15

Laterali t sindizes bei der Reimgenerierungsaufgabe

Auch bei der Reimgenerierungsaufgabe liegt der Gruppenmittelwert  ber alle drei ROI-Radien hinweg im positiven Bereich ($M_{\text{Radius10}} = 0.13$, $\text{Range}_{\text{Radius10}}: \text{Min} = -0.26$, $\text{Max} = 0.52$; $M_{\text{Radius20}} = 0.13$, $\text{Range}_{\text{Radius20}}: \text{Min} = -0.18$, $\text{Max} = 0.39$; $M_{\text{Radius30}} = 0.13$, $\text{Range}_{\text{Radius30}}: \text{Min} = -0.15$, $\text{Max} = 0.33$). Nur die Versuchspersonen 15 und 19 haben  ber alle drei ROI-Radien hinweg einen negativen Laterali t sindex.  ber alle drei Radien betrachtet, liegen diese Werte wiederum nur bei Versuchsperson 19 deutlich im negativen Bereich ($\text{fMRT-LI} \leq -0.10$) (s. o.; siehe Tabellen 17 und 18). Die Korrelationen der Laterali t sindizes, berechnet f r die verschiedenen ROI-Radien, liegen auch in der Reimgenerierungsbedingung durchg ngig im hoch signifikanten Bereich ($r_{10/20} = .77$, $p < .001$; $r_{10/30} = .77$, $p < .001$; $r_{20/30} = .94$, $p < .001$).

Tabelle 18: *Individuelle Laterali t sindizes nach Fern ndez f r Kontrast 2 „Reimgenerierung minus Ruhe“ (ROI-Mittelpunkt: MNI-Koordinaten:-51 19 -5/Voxel-Koordinaten: 65.5 66.3 23.4; fMRT-LI < -.10 unterstrichen)*

	Radius 10 mm	Radius 20 mm	Radius 30 mm
VP1	0.09	0.15	0.13
VP2	0.10	0.12	0.16
VP3	0.17	0.18	0.22

[Fortsetzung Tabelle 18]

	Radius 10 mm	Radius 20 mm	Radius 30 mm
VP4	0.28	0.28	0.25
VP5	0.11	0.11	0.16
VP6	0.04	-0.01	0.05
VP7	0.13	0.13	0.19
VP9	0.28	0.28	0.25
VP10	0.34	0.10	0.10
VP11	0.21	0.21	0.11
VP12	-0.04	0.11	0.14
VP13	0.02	-0.05	-0.04
VP15	<u>-0.26</u>	<u>-0.15</u>	-0.09
VP16	0.16	0.10	0.11
VP17	0.12	0.11	0.11
VP18	0.52	0.36	0.32
VP19	<u>-0.24</u>	<u>-0.18</u>	<u>-0.15</u>
VP20	0.09	-0.01	-0.03
VP21	0.22	0.22	0.19
VP23	<u>-0.21</u>	0.05	0.03
VP24	0.45	0.39	0.33
VP25	0.02	0.01	-0.01
VP26	0.21	0.20	0.17
VP28	0.13	-0.05	0.10
VP30	0.26	0.20	0.16
VP31	0.21	0.22	0.20
VP32	0.06	0.01	0.01
VP33	0.11	0.16	0.15
VP34	0.07	0.39	0.31
VP35	0.19	0.19	0.18
VP36	0.14	0.20	0.15
VP37	0.18	0.12	0.17
VP38	-0.02	0.00	0.07
Mittelwert	0.13	0.13	0.13

Vergleich der individuellen Lateralitätsindizes von Wort- und Reimgenerierung nach Fernández-Ansatz

Die Korrelationen der Lateralitätsindizes zwischen den beiden Bedingungen liegen jeweils im hoch signifikanten Bereich ($r_{WG/RG10} = .52, p = .002$; $r_{WG/RG20} = .76, p < .001$; $r_{WG/RG30} = .73, p < .001$; $r_{WG/RGMittelwert}^{11} = .66, p < .001$). Der Unterschied im fMRT-LI zwischen Wort- und Reimgenerierung wird unter keinem ROI-Radius signifikant (t -Test für abhängige Stichproben: $t_{10} = 0.09, p = .927$; $t_{20} = 1.89, p = .068$; $t_{30} = 1.19, p = .244$; $t_{Mittelwert} = 0.84, p = .405$). Die einfache Übereinstimmung in der Vorhersage der dominanten Hemisphäre zwischen den Bedingungen steigt mit zunehmendem ROI-Radienumfang an (Übereinstimmung bei 10 mm: 79%; Übereinstimmung bei 20 mm: 85%; Übereinstimmung bei 30 mm: 94%) (siehe Abbildung 38).

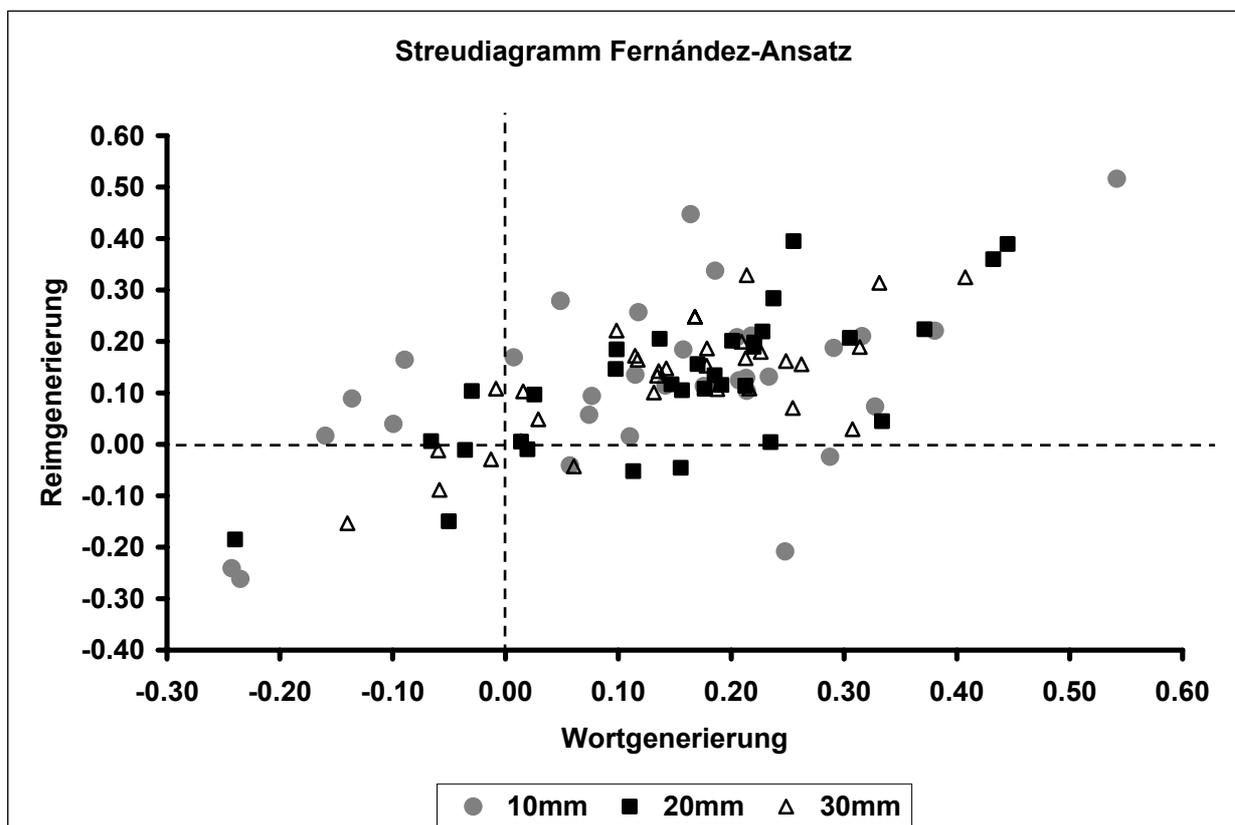


Abbildung 38: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre beim Fernández-Ansatz (drei verschiedene ROI-Radien)

¹¹ Mittelwert = der über alle drei ROI-Radien gemittelte fMRT-Lateralitätsindex pro Aufgabenbedingung (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.)

4.1.2.2.2. Nach Voxelcount-Ansatz

Lateraliitätsindex bei der Wortgenerierungsaufgabe

Der Lateraliitätsindex bei der Wortgenerierungsaufgabe, berechnet nach dem Voxelcount-Ansatz, liegt im Gruppenmittel für alle drei ROI-Radien (10 mm, 20 mm und 30 mm; s. o.) und für jeden Signifikanzschwellenwert (von $p < .10$ bis $p < .001$ *family wise error corrected*; siehe Abschnitt 3.1.4.6.) im positiven Bereich, d. h. auch hier ist die linke Hemisphäre in der entsprechenden Region-of-Interest im Durchschnitt stärker als die rechte Hemisphäre aktiviert ($M_{WG10} = .04$ bis $.38$; $M_{WG20} = .11$ bis $.52$; $M_{WG30} = .19$ bis $.51$; siehe Tabelle 19). Auffällig ist der Anstieg im fMRT-LI vom ROI-Radius 10 mm zu 20 mm. Die ROI-Radien 20 mm und 30 mm unterscheiden sich dagegen nur bei niedrigeren Signifikanzschwellen, ab einem p -Wert $< .0001$ sind diese Unterschiede marginal. Auf individueller Ebene spricht bei einem ROI-Radius von 10 mm noch bei acht Versuchspersonen (Vpn 10, 13, 15, 16, 19, 25, 34 und 36) der Lateraliitätsindex für eine rechtshemisphärische Sprachdominanz (siehe Tabelle 19; **fett gedruckt**). Bei der fMRT-LI-Berechnung für den ROI-Radius 20 mm deutet sich eine rechtshemisphärische Dominanz noch bei fünf (Vpn 10, 13, 15, 19 und 25), bei einem ROI-Radius von 30 mm sogar nur noch bei drei Versuchspersonen (Vpn 10, 15 und 19) an. Bei der Analyse der Lateraliitätsindizes nach der in Abschnitt 3.1.4.6.2. beschriebenen Vorgehensweise (fMRT-LI-Berechnung bei definierter Anzahl an Voxels in beiden Hemisphären) spricht der Lateraliitätsindex, bei Betrachtung der fMRT-LI-Werte für die drei ROI-Radien, nur bei den Versuchspersonen 10, 15, 19 und 25 für eine Dominanz der rechten homologen Hirnareale (siehe Tabelle 19; unterstrichen).

Tabelle 19: Individuelle Lateraliitätsindizes nach Voxelcount-Ansatz für Kontrast 1: „Wortgenerierung minus Ruhe“ (ROI-Radien 10 mm, 20 mm und 30 mm; ROI-Mittelpunkt: MNI-Koordinaten: -55 18 -5/ Voxel-Koordinaten: 67.5 65.9 23.3)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP1	0.00	0.00	0.05	<u>0.09</u>	0.11	0.04	-0.21	-0.24	-0.20
VP2	<u>0.15</u>	0.19	0.30	0.47	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00
VP3	-0.03	-0.03	0.00	<u>0.11</u>	0.30	0.67	1.00	1.00	
VP4	0.19	0.18	<u>0.21</u>	0.24	0.30	0.35	0.37	0.41	0.54
VP5	0.04	0.09	0.12	0.22	<u>0.29</u>	0.37	0.53	0.60	0.71

[Fortsetzung Tabelle 19]

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP6	0.17	0.18	<u>0.24</u>	0.45	0.57	0.43			
VP7	0.21	<u>0.25</u>	0.36	0.55	0.79	1.00	1.00	1.00	
VP9	0.19	0.18	<u>0.21</u>	0.24	0.30	0.35	0.37	0.41	0.58
VP10	-0.02	0.02	<u>0.06</u>	-0.01	-0.13	-0.25	-0.38	-0.44	-0.27
VP11	0.13	<u>0.17</u>	0.31	0.50	0.80				
VP12	0.13	0.14	<u>0.17</u>	0.26	0.36	0.58	0.95	1.00	1.00
VP13	-0.08	<u>-0.09</u>	-0.04	-0.01	-0.03	0.02			
VP15	-0.29	-0.37	-0.71	-0.86	-1.00				
VP16	-0.04	-0.03	<u>-0.02</u>	-0.05	-0.10	-0.19	-0.60	-0.90	-1.00
VP17	0.04	0.05	0.08	0.09	0.11	0.12	0.15	0.14	<u>0.16</u>
VP18	<u>0.79</u>	0.84	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
VP19	-0.73	-0.79	-0.87	-1.00					
VP20	0.09	0.08	<u>0.10</u>	0.05	0.01	-0.02	0.31	0.45	
VP21	<u>0.10</u>	0.21	0.74	0.98	1.00	1.00	1.00		
VP23	<u>0.31</u>	0.44	0.73	1.00	1.00	1.00			
VP24	<u>0.29</u>	0.32	0.23	-0.44					
VP25	-0.06	-0.10	-0.15	-0.25	-0.39	-0.51	-0.63	-0.68	-0.69
VP26	0.04	0.05	0.06	0.08	0.13	0.17	0.26	<u>0.29</u>	0.35
VP28	-0.13	-0.10	0.19	0.90					
VP30	-0.01	0.00	0.02	<u>0.03</u>	0.06	0.15	0.33	0.42	0.62
VP31	0.01	0.02	0.06	0.10	0.13	0.14	0.16	0.17	<u>0.19</u>
VP32	0.00	0.02	0.05	<u>0.15</u>	0.22	0.22	0.21	0.17	0.11
VP33	0.06	0.08	0.10	0.15	<u>0.19</u>	0.23	0.29	0.31	0.36
VP34	-0.23	-0.20	-0.14						
VP35	0.12	0.17	0.31	0.46	<u>0.59</u>	0.69	0.84	0.86	0.93
VP36	-0.18	-0.20	-0.28	-0.36	-0.36	-0.31	-0.11	0.37	
VP37	0.01	-0.02	-0.06	<u>-0.06</u>	-0.04	0.04	0.27	0.40	0.57
VP38	0.09	0.11	<u>0.24</u>	0.44	0.62	0.79	0.99	1.00	1.00
Mittelwert	0.04	0.06	0.11	0.17	0.26	0.34	0.38	0.38	0.37

Radius WG_{10} (Fett: fMRT-LI < -.10; unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~500 Voxels aktiviert sind; FWE = family wise error)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP1	0.02	0.04	0.16	0.29	<u>0.41</u>	0.46	0.47	0.46	0.51
VP2	0.42	0.50	<u>0.63</u>	0.74	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00
VP3	0.03	0.05	0.08	0.16	0.26	<u>0.51</u>	0.82	0.88	0.97
VP4	0.06	0.08	0.07	<u>0.14</u>	0.28	0.43	0.54	0.60	0.69
VP5	0.06	0.08	0.13	0.22	0.31	<u>0.41</u>	0.63	0.69	0.78
VP6	0.20	0.24	<u>0.35</u>	0.49	0.54	0.55			
VP7	0.27	0.29	<u>0.31</u>	0.37	0.66	1.00	1.00	1.00	
VP9	0.06	0.08	0.07	<u>0.14</u>	0.28	0.43	0.54	0.60	0.69
VP10	-0.18	-0.18	-0.19	-0.16	-0.19	-0.22	-0.29	-0.31	-0.35
VP11	0.02	0.05	<u>0.09</u>	0.23	0.63	1.00			
VP12	0.34	0.41	<u>0.53</u>	0.60	0.67	0.78	0.98	1.00	1.00
VP13	-0.04	-0.05	-0.04	<u>-0.03</u>	-0.10	-0.12			
VP15	-0.05	-0.07	-0.14	-0.23	-0.34	-0.30	-0.36	-0.58	
VP16	0.28	0.32	0.36	0.31	<u>0.23</u>	0.15	-0.03	-0.15	-0.19
VP17	0.09	0.11	0.13	0.16	0.17	0.17	0.20	0.20	<u>0.23</u>
VP18	0.47	0.53	<u>0.69</u>	0.75	0.87	0.99	1.00	1.00	1.00
VP19	-0.42	-0.57	-0.83	-0.99	-1.00	-1.00			
VP20	0.05	0.04	0.03	-0.06	-0.12	-0.16	0.00	0.11	0.24
VP21	<u>0.39</u>	0.51	0.86	0.99	1.00	1.00	1.00		
VP23	<u>0.39</u>	0.55	0.86	1.00	1.00	1.00			
VP24	<u>0.22</u>	0.13	0.09	-0.47					
VP25	0.04	0.02	0.00	-0.04	-0.09	-0.16	-0.22	-0.26	-0.30
VP26	0.11	0.12	0.15	0.19	0.24	0.27	0.33	0.35	<u>0.39</u>
VP28	0.14	<u>0.20</u>	0.38	0.61	0.88	1.00			
VP30	0.06	0.09	0.14	<u>0.21</u>	0.32	0.43	0.57	0.65	0.79
VP31	0.01	0.02	0.07	0.12	0.15	0.18	0.22	0.23	<u>0.26</u>
VP32	0.06	0.08	0.11	0.16	0.16	0.13	0.07	<u>0.04</u>	0.02
VP33	0.03	0.06	0.13	0.21	0.26	<u>0.28</u>	0.35	0.36	0.40
VP34	<u>0.39</u>	0.52	0.71	0.88	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
VP35	0.13	0.16	0.22	0.29	0.33	0.37	0.43	0.46	<u>0.48</u>
VP36	-0.07	-0.04	-0.03	-0.01	<u>0.03</u>	0.12	0.42	0.61	0.81
VP37	-0.03	-0.05	-0.06	-0.03	<u>0.04</u>	0.16	0.40	0.50	0.65
VP38	0.15	0.20	0.34	0.53	<u>0.65</u>	0.77	0.95	0.97	0.98
Mittelwert	0.11	0.14	0.19	0.24	0.32	0.39	0.46	0.46	0.52

Radius WG_{20} (Fett: fMRT-LI < -.10; unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~1000

Voxels aktiviert sind; FWE = family wise error)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (<i>FWE</i>)	$p < .01$ (<i>FWE</i>)	$p < .001$ (<i>FWE</i>)
VP1	-0.03	-0.01	0.08	0.20	0.34	<u>0.39</u>	0.43	0.44	0.51
VP2	0.53	0.61	0.72	<u>0.80</u>	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00
VP3	0.03	0.05	0.10	0.20	0.33	0.55	<u>0.86</u>	0.94	0.99
VP4	0.09	0.09	0.09	<u>0.15</u>	0.26	0.38	0.51	0.58	0.69
VP5	0.05	0.07	0.14	0.24	0.33	0.45	<u>0.66</u>	0.73	0.82
VP6	0.14	0.15	0.20	<u>0.37</u>	0.42	0.39			
VP7	0.35	0.39	<u>0.42</u>	0.55	0.78	1.00	1.00	1.00	
VP9	0.09	0.09	0.09	<u>0.15</u>	0.26	0.38	0.51	0.58	0.69
VP10	-0.06	-0.07	-0.09	-0.11	-0.17	-0.20	-0.25	-0.25	-0.22
VP11	0.08	0.09	0.12	<u>0.16</u>	0.33	0.61			
VP12	0.39	0.46	0.56	0.63	<u>0.67</u>	0.74	0.93	0.98	1.00
VP13	0.10	0.12	0.12	<u>0.11</u>	-0.02	-0.08			
VP15	0.03	0.02	-0.02	-0.13	-0.23	-0.35	-0.56	-0.73	-0.86
VP16	0.33	0.38	0.46	0.47	0.46	<u>0.43</u>	0.32	0.25	0.22
VP17	0.11	0.11	0.12	0.15	0.18	0.21	0.27	0.29	<u>0.33</u>
VP18	0.37	0.41	0.54	<u>0.65</u>	0.82	0.96	1.00	1.00	1.00
VP19	-0.12	-0.17	-0.31	-0.46	-0.59	-0.75			
VP20	0.14	0.16	0.20	0.23	0.22	<u>0.17</u>	0.26	0.33	0.44
VP21	0.53	<u>0.62</u>	0.88	0.99	1.00	1.00	1.00		
VP23	0.37	<u>0.59</u>	0.89	1.00	1.00	1.00			
VP24	0.53	<u>0.55</u>	0.58	0.33					
VP25	0.15	0.14	0.14	0.12	0.07	0.01	<u>0.00</u>	-0.01	0.00
VP26	0.19	0.20	0.22	0.26	0.31	0.33	0.35	0.35	<u>0.36</u>
VP28	0.33	0.41	0.56	<u>0.70</u>	0.88	0.97	1.00		
VP30	0.09	0.11	0.12	0.16	<u>0.22</u>	0.30	0.45	0.53	0.65
VP31	0.12	0.15	0.23	0.32	0.36	0.38	0.38	0.37	<u>0.38</u>
VP32	0.12	0.14	0.16	0.19	0.19	0.17	0.12	0.09	<u>0.06</u>
VP33	0.10	0.12	0.16	0.20	0.23	0.25	<u>0.34</u>	0.38	0.46
VP34	0.43	0.53	<u>0.70</u>	0.91	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00
VP35	0.21	0.26	0.33	0.40	0.44	0.49	0.56	0.58	<u>0.62</u>
VP36	0.05	0.08	0.09	0.08	0.10	<u>0.15</u>	0.32	0.42	0.58
VP37	0.06	0.04	0.03	0.02	0.06	<u>0.16</u>	0.38	0.50	0.66
VP38	0.21	0.26	0.36	0.48	0.55	0.63	<u>0.75</u>	0.79	0.83
Mittelwert	0.19	0.22	0.27	0.32	0.36	0.41	0.50	0.49	0.51

Radius WG_{30} (Fett: fMRT-LI < -10; unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~1000 Voxels aktiviert sind; *FWE* = family wise error)

Laterali tsindex bei der Reimgenerierungsaufgabe

Die  ber die Gesamtgruppe gemittelten Laterali tsindizes der Reimgenerierungsaufgabe liegen auch bis auf zwei Ausnahmen (siehe Tabelle 20) im positiven Bereich, d. h. auch bei der Reimgenerierung ist die linke Hemisph re in der entsprechenden Region-of-Interest im Durchschnitt st rker als die rechte Hemisph re aktiviert ($M_{RG10} = -.03$ bis $.18$; $M_{RG20} = .07$ bis $.32$; $M_{RG30} = .12$ bis $.36$; siehe Tabelle 20). Auff llig ist hierbei ein eher kontinuierlicher Anstieg der Laterali tsindizes mit ansteigendem ROI-Radius ($10 \text{ mm} < 20 \text{ mm} < 30 \text{ mm}$).

Auf Versuchspersonenebene spricht bei einem ROI-Radius von 10 mm bei neun Versuchspersonen (Vpn 13, 15, 17, 19, 20, 23, 25, 34 und 36) der Laterali tsindex f r eine rechtshemisph rische Sprachdominanz (siehe Tabelle 20; **fett** gedruckt). Diese rechtshemisph rische Dominanz ist bei einem ROI-Radius von 20 mm noch bei f nf Versuchspersonen (Vpn 10, 13, 15, 19 und 20) und bei einem ROI-Radius von 30 mm sogar nur noch bei drei Versuchspersonen (Vpn 13, 15 und 19) auszumachen.

Bei der Analyse der Laterali tsindizes nach der in Abschnitt 3.1.4.6.2. beschriebenen Vorgehensweise (fMRT-LI-Berechnung bei definierter Anzahl an Voxels in beiden Hemisph ren) spricht der Laterali tsindex, bei Betrachtung der fMRT-LI-Werte f r die drei ROI-Radien, nur bei den Versuchspersonen 13, 15, 19, 20 und 23 f r eine st rkere Beteiligung der rechten sprachrelevanten Areale (siehe Tabelle 20; unterstrichen).

Tabelle 20: Individuelle Laterali tsindizes nach Voxelcount-Ansatz f r Kontrast 2: „Reimgenerierung minus Ruhe“ (ROI-Radien 10 mm, 20 mm und 30 mm; ROI-Mittelpunkt: MNI-Koordinaten: -51 19 -5/ Voxel-Koordinaten: 65.5 66.3 23.4)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP1	0.14	0.13	<u>0.16</u>	0.24	0.45	0.69			
VP2	0.02	0.03	0.06	<u>0.07</u>	0.11	0.16	0.30	0.36	0.43
VP3	-0.02	0.03	<u>0.17</u>	0.78	1.00	1.00	1.00	1.00	
VP4	0.09	0.10	0.13	0.15	<u>0.22</u>	0.31	0.56	0.75	0.91
VP5	-0.03	-0.02	-0.01	0.03	0.09	0.14	<u>0.24</u>	0.30	0.33
VP6	0.12	0.20	<u>0.31</u>	0.41	0.48	0.54	0.76	0.78	
VP7	0.03	0.04	0.11	<u>0.26</u>	0.40	0.50	0.68	0.77	0.95
VP9	0.09	0.10	0.13	0.15	<u>0.22</u>	0.31	0.56	0.75	0.91
VP10	0.11	0.11	<u>0.14</u>	0.00	-0.10	-0.12			

[Fortsetzung Tabelle 20]

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP11	0.00	0.01	0.02	0.04	0.06	<u>0.16</u>	0.31	0.33	0.43
VP12	0.00	0.01	0.05	<u>0.07</u>	0.13	0.05	0.09	0.08	0.11
VP13	-0.03	-0.03	-0.05	<u>-0.10</u>	-0.16	-0.22	-0.55	-0.80	-1.00
VP15	-0.33	<u>-0.39</u>	-0.54	-0.74	-0.91	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
VP16	0.01	0.03	0.05	<u>0.07</u>	0.08	0.07	0.06	0.06	0.03
VP17	0.01	-0.02	-0.04	-0.07	-0.08	-0.08	<u>-0.10</u>	-0.10	-0.10
VP18	0.44	<u>0.53</u>	0.72	0.94	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
VP19	-0.33	<u>-0.38</u>	-0.57	-0.92	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
VP20	-0.05	-0.07	-0.11	<u>-0.21</u>	-0.28	-0.29	-0.35	-0.35	-0.31
VP21	-0.03	-0.03	<u>0.08</u>	0.34	0.66	0.82	1.00		
VP23	<u>-0.64</u>	-0.66	-0.63	-0.46	-0.35				
VP24	<u>0.25</u>	0.44	0.64	0.93					
VP25	-0.12	-0.15	<u>-0.23</u>	-0.29	-0.33	-0.35	-0.34	-0.39	
VP26	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.11	0.15	0.17	<u>0.18</u>
VP28	<u>0.06</u>	0.25	0.78						
VP30	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.03	0.07	<u>0.19</u>	0.24	0.34
VP31	0.00	0.01	0.03	0.06	0.08	0.09	0.10	0.12	<u>0.15</u>
VP32	-0.05	-0.03	0.02	0.10	<u>0.19</u>	0.24	0.32	0.33	0.35
VP33	-0.04	0.00	0.03	0.06	<u>0.05</u>	0.05	0.10	0.12	0.09
VP34	<u>-0.44</u>	-0.46							
VP35	0.01	0.02	0.07	0.15	0.24	0.32	0.46	<u>0.51</u>	0.58
VP36	-0.12	-0.14	-0.20	<u>-0.24</u>	-0.25	-0.26	-0.16	-0.05	0.10
VP37	0.01	0.01	0.06	0.13	0.18	<u>0.21</u>	0.28	0.32	0.39
VP38	-0.06	-0.07	-0.10	-0.10	-0.07	<u>-0.01</u>	0.10	0.16	0.29
Mittelwert	-0.03	-0.01	0.04	0.06	0.07	0.12	0.18	0.17	0.18

Radius RG_{10} (Fett: fMRT-LI < -.10; Unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~500 Voxels aktiviert sind; FWE = family wise error)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (FWE)	$p < .01$ (FWE)	$p < .001$ (FWE)
VP1	-0.05	-0.05	0.06	<u>0.21</u>	0.32	0.38	0.29	0.33	
VP2	0.20	0.24	0.30	0.36	<u>0.43</u>	0.50	0.58	0.61	0.65
VP3	0.06	0.10	0.19	<u>0.57</u>	0.81	0.91	1.00	1.00	1.00
VP4	0.13	0.16	0.19	0.23	0.31	<u>0.43</u>	0.72	0.88	0.96
VP5	0.03	0.05	0.06	0.12	0.17	0.24	0.36	<u>0.42</u>	0.49
VP6	0.07	0.13	<u>0.24</u>	0.32	0.33	0.35	0.61	0.78	
VP7	0.23	0.28	0.38	<u>0.44</u>	0.53	0.60	0.72	0.80	0.95
VP9	0.13	0.16	0.19	0.23	0.31	<u>0.43</u>	0.72	0.88	0.96
VP10	-0.05	-0.04	-0.05	-0.08	<u>-0.09</u>	-0.09	-0.09	-0.05	-0.05
VP11	0.00	0.00	0.00	-0.03	-0.05	-0.08	<u>-0.07</u>	-0.03	0.16
VP12	0.22	0.27	0.39	0.50	<u>0.58</u>	0.59	0.63	0.66	0.70
VP13	-0.05	-0.05	-0.10	<u>-0.12</u>	-0.26	-0.42	-0.67	-0.85	-1.00
VP15	-0.08	-0.11	-0.17	-0.29	<u>-0.37</u>	-0.47	-0.69	-0.78	-0.94
VP16	0.20	0.22	0.25	0.26	0.25	0.22	<u>0.19</u>	0.17	0.17
VP17	0.01	-0.02	-0.04	-0.02	0.02	0.04	0.09	<u>0.11</u>	0.13
VP18	0.21	0.26	<u>0.36</u>	0.55	0.63	0.69	0.91	0.97	1.00
VP19	-0.14	-0.19	-0.34	<u>-0.66</u>	-0.88	-0.95	-1.00	-1.00	-1.00
VP20	-0.01	0.00	-0.02	-0.08	<u>-0.14</u>	-0.13	-0.16	-0.18	-0.12
VP21	0.07	0.10	0.25	<u>0.56</u>	0.84	0.92	1.00	1.00	1.00
VP23	-0.15	<u>-0.11</u>	0.00	0.19	0.35	0.43	0.84	1.00	
VP24	0.37	<u>0.46</u>	0.68	0.94					
VP25	0.08	0.08	0.07	<u>0.00</u>	-0.09	-0.12	0.01	0.10	0.32
VP26	0.05	0.04	0.05	0.08	0.10	0.14	0.17	<u>0.19</u>	0.18
VP28	0.17	<u>0.26</u>	0.37	0.31	0.16				
VP30	0.12	0.14	0.15	0.15	0.18	0.22	0.30	0.35	<u>0.39</u>
VP31	0.05	0.07	0.09	0.13	0.17	0.19	0.21	0.22	<u>0.25</u>
VP32	0.02	0.04	0.09	0.13	0.16	0.15	0.15	<u>0.14</u>	0.14
VP33	-0.10	-0.08	-0.02	0.06	0.14	<u>0.21</u>	0.35	0.42	0.49
VP34	<u>0.52</u>	0.67	0.84	0.97	1.00	1.00			
VP35	0.01	0.03	0.06	0.10	0.15	0.19	0.24	0.28	<u>0.31</u>
VP36	-0.07	-0.04	-0.02	0.03	0.10	<u>0.16</u>	0.31	0.41	0.60
VP37	-0.02	-0.02	0.00	0.06	0.11	0.15	0.24	<u>0.30</u>	0.39
VP38	0.05	0.05	0.05	0.06	0.10	0.17	<u>0.26</u>	0.32	0.42
Mittelwert	0.07	0.09	0.14	0.19	0.20	0.23	0.27	0.32	0.32

Radius RG_{20} (Fett: fMRT-LI < -.10; unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~1000 Voxels aktiviert sind; FWE = family wise error)

	$p < .10$	$p < .05$	$p < .01$	$p < .001$	$p < .0001$	$p < .00001$	$p < .05$ (<i>FWE</i>)	$p < .01$ (<i>FWE</i>)	$p < .001$ (<i>FWE</i>)
VP1	-0.13	-0.12	-0.02	<u>0.08</u>	0.13	0.18	0.25	0.33	0.49
VP2	0.30	0.33	0.38	0.41	<u>0.46</u>	0.51	0.59	0.61	0.65
VP3	0.10	0.14	0.25	0.61	0.82	<u>0.94</u>	1.00	1.00	1.00
VP4	0.08	0.11	0.17	0.24	0.36	<u>0.49</u>	0.75	0.88	0.97
VP5	-0.01	0.00	0.02	0.09	0.18	0.25	0.37	0.43	<u>0.51</u>
VP6	0.02	0.04	0.12	<u>0.22</u>	0.36	0.41	0.47	0.65	
VP7	0.33	0.37	0.50	<u>0.59</u>	0.68	0.73	0.81	0.86	0.97
VP9	0.08	0.11	0.17	0.24	0.36	<u>0.49</u>	0.75	0.88	0.97
VP10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.09	<u>0.15</u>	0.26	0.35	0.48
VP11	0.07	0.08	0.08	0.06	0.04	-0.01	<u>-0.04</u>	-0.02	0.11
VP12	0.35	0.39	0.50	0.59	0.63	<u>0.62</u>	0.65	0.66	0.70
VP13	0.00	0.00	<u>-0.06</u>	-0.06	-0.21	-0.38	-0.67	-0.85	-1.00
VP15	-0.06	-0.10	-0.17	-0.24	-0.30	-0.39	-0.60	-0.68	-0.82
VP16	0.26	0.28	0.32	0.35	0.36	0.37	0.37	<u>0.37</u>	0.39
VP17	0.06	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10	0.14	0.14	<u>0.18</u>
VP18	0.22	0.26	0.38	<u>0.57</u>	0.68	0.73	0.91	0.97	1.00
VP19	-0.02	-0.06	-0.16	-0.42	-0.60	-0.72	-0.96	-1.00	-1.00
VP20	<u>0.14</u>	0.16	0.21	0.22	0.17	0.14	0.06	0.02	0.05
VP21	0.11	0.15	0.29	0.58	<u>0.84</u>	0.93	1.00	1.00	1.00
VP23	-0.07	-0.01	<u>0.07</u>	0.26	0.43	0.47	0.85	1.00	
VP24	0.49	0.59	<u>0.74</u>	0.91	1.00				
VP25	0.29	0.30	0.28	0.21	<u>0.12</u>	0.10	0.23	0.28	0.50
VP26	0.08	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	<u>0.08</u>
VP28	0.33	0.45	<u>0.62</u>	0.68	0.70	0.80			
VP30	0.14	0.17	0.19	0.20	0.22	0.25	0.31	0.35	<u>0.37</u>
VP31	0.16	0.18	0.23	0.27	0.30	0.31	0.31	0.31	<u>0.32</u>
VP32	0.08	0.10	0.13	0.15	0.17	0.15	0.12	0.09	<u>0.07</u>
VP33	0.04	0.03	0.07	0.17	0.24	0.28	<u>0.41</u>	0.47	0.53
VP34	0.41	<u>0.59</u>	0.81	0.98	1.00	1.00			
VP35	0.17	0.20	0.25	0.28	0.31	0.34	0.38	0.41	<u>0.42</u>
VP36	-0.05	-0.05	-0.04	-0.01	0.03	0.07	0.14	<u>0.18</u>	0.27
VP37	-0.03	-0.03	-0.01	0.03	0.09	0.17	0.27	<u>0.34</u>	0.43
VP38	0.09	0.09	0.10	0.13	0.18	0.26	<u>0.36</u>	0.43	0.52
Mittelwert	0.12	0.15	0.20	0.26	0.30	0.31	0.32	0.35	0.36

Radius RG₃₀ (Fett: fMRT-LI < -.10; unterstrichen: fMRT-LI für die Signifikanzschwelle, bei der ~1000 Voxels aktiviert sind; *FWE* = family wise error)

Vergleich der individuellen Lateralitätsindizes von Wort- und Reimgenerierung beim Voxelcount-Ansatz

Die Korrelationen der Lateralitätsindizes (berechnet über die in Abschnitt 3.1.4.6.2. beschriebene Methode) zwischen den beiden Bedingungen liegen jeweils im hoch signifikanten Bereich ($r_{WG/RG10} = .66, p < .001$; $r_{WG/RG20} = .75, p < .001$; $r_{WG/RG30} = .75, p < .001$; $r_{WG/RGMittelwert} = .73, p < .001$). Der Unterschied im fMRT-LI_{Voxelcount} zwischen Wort- und Reimgenerierung wird unter keinem ROI-Radius signifikant (*t-Test* für abhängige Stichproben: $t_{10} = 1.24, p = .226$; $t_{20} = 0.50, p = .618$; $t_{30} = 1.11, p = .276$; $t_{Mittelwert} = 1.14, p = .263$).

Vergleicht man die *t*-Schwellenwerte, ab denen die entsprechende Voxelgrenze (500 Voxels bei Radius 10 mm sowie 1000 Voxels bei den Radien 20 mm und 30 mm; siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) bei jeder Bedingung erreicht wurde, zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Aufgaben (Unterschied *t*-Schwellenwert_{WG/RG10}: $t = 4.33, p < .001$; Unterschied *t*-Schwellenwert_{WG/RG20}: $t = 3.37, p = .002$; Unterschied *t*-Schwellenwert_{WG/RG30}: $t = 2.59, p = .014$) in der Hinsicht, dass bei der Wortgenerierung im Vergleich zur Reimgenerierung diese Voxelanzahl erst auf einer deutlich niedrigeren *t*-Schwelle erreicht wird.

Die einfache Übereinstimmung in der Vorhersage der dominanten Hemisphäre zwischen den Bedingungen steigt vom ROI-Radienumfang 10 mm zum Radius 20 mm an, verbessert sich allerdings nicht noch weiter mit größerem Radienumfang (Übereinstimmung bei 10 mm: 79%; Übereinstimmung bei 20 mm: 91%; Übereinstimmung bei 30 mm: 91%) (siehe Abbildung 39).

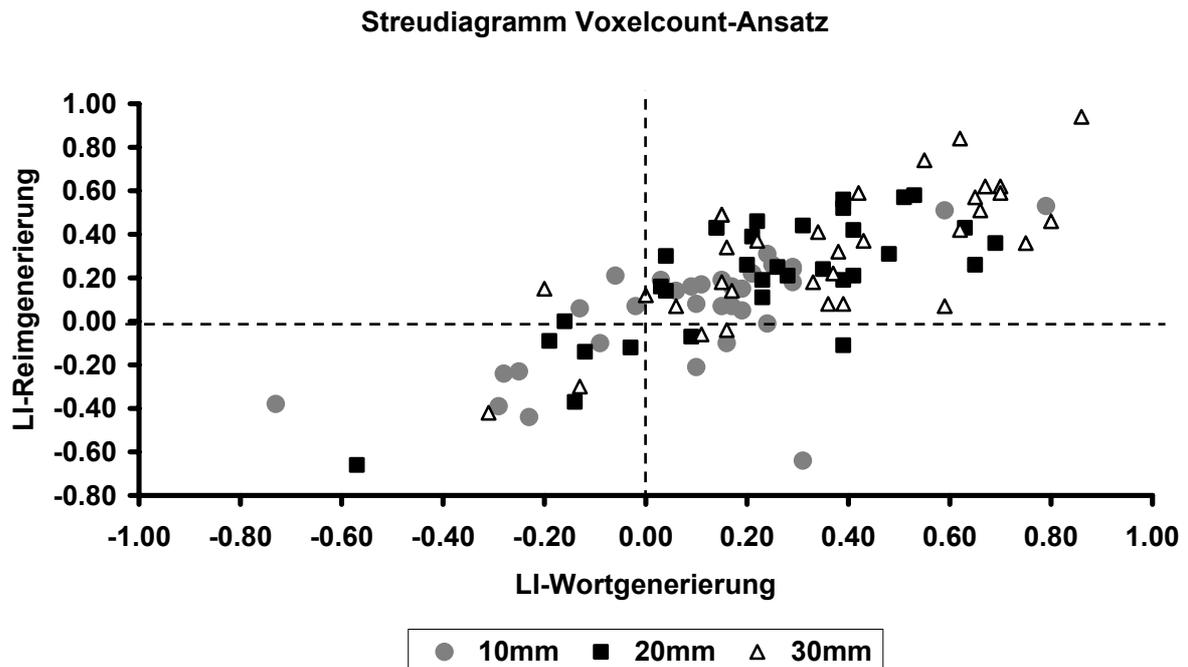


Abbildung 39: **Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre beim Voxelcount-Ansatz (drei verschiedene ROI-Radien)**

4.1.2.2.3. Vergleich zwischen Fernández- und Voxelcount-Ansatz

Der Vergleich zwischen dem Fernández- und Voxelcount-Ansatz (siehe Abbildung 40) zeigt eine hohe Übereinstimmung in der Vorhersage bezüglich der Lateralität. Die Korrelationen zwischen beiden Ansätzen und unter jeder ROI-Größe liegen jeweils im hochsignifikanten Bereich ($r_{WG10} = .61, p < .001$; $r_{WG20} = .65, p < .001$; $r_{WG30} = .71, p < .001$; $r_{WGMittelwert} = .72, p < .001$; $r_{RG10} = .73, p < .001$; $r_{RG20} = .70, p < .001$; $r_{RG30} = .79, p < .001$; $r_{RGMittelwert} = .78, p < .001$). Die Korrelationen innerhalb der Reimgenerierung liegen dabei jedoch leicht höher als die innerhalb der Wortgenerierung. Die höchste Korrelation zwischen beiden Ansätzen ergibt sich dabei jeweils für den ROI-Radius 30 mm. In Abbildung 40 wird die Übereinstimmung zwischen den beiden Lateralitätsberechnungsmethoden (Voxelcount- und Fernández-Ansatz) exemplarisch für den über alle drei ROI-Radien gemittelten fMRT-Lateralitätsindex dargestellt (gemittelter fMRT-LI siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.). Für die Wortgenerierungsaufgabe ergibt sich dabei eine Konkordanz von 85% (28 von 33 Vpn) in der Vorhersage der Hemisphärendominanz. Bei der Reimgenerierungsaufgabe liegt sie sogar bei 94% (31 von 33 Vpn).

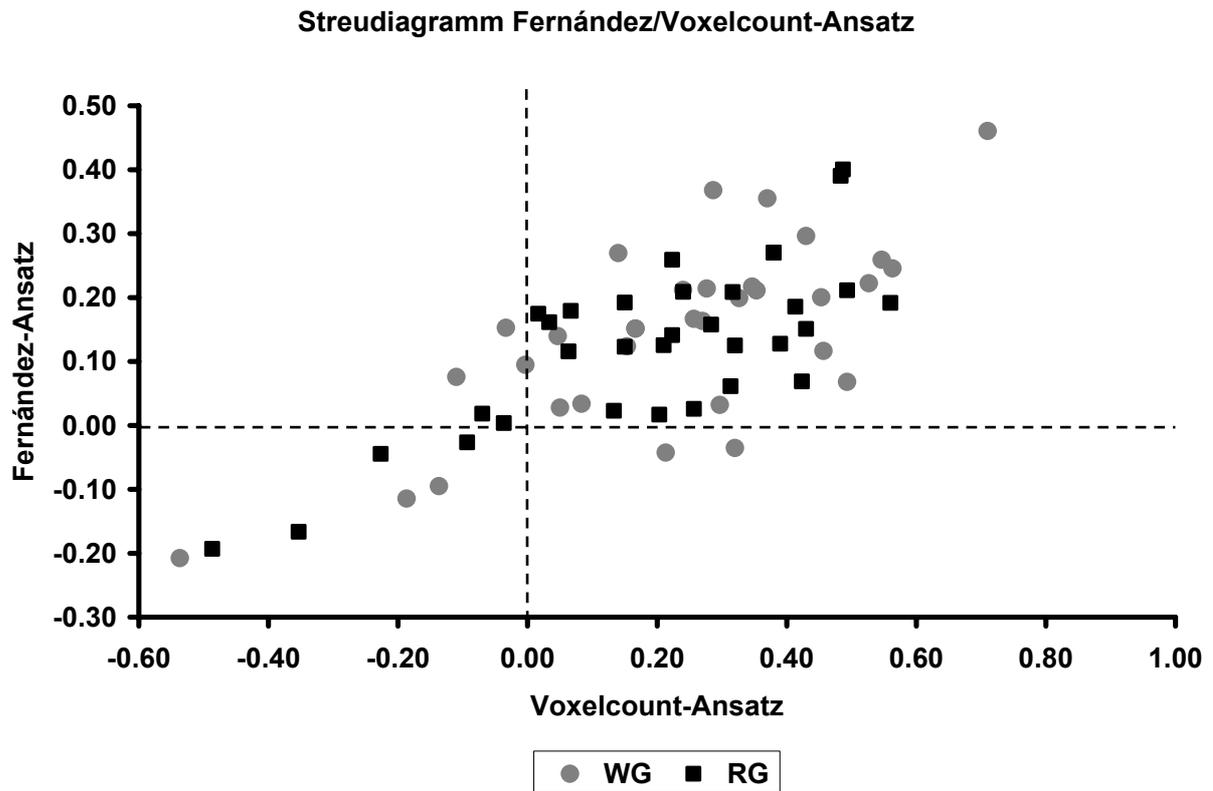


Abbildung 40: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen Fernández- und Voxelcount-Ansatz

4.1.2.3. fMRT-Aktivierungen auf Gruppenebene

Im Folgenden werden die Ergebnisse auf Gruppenebene dargestellt. Hierzu wurden die entsprechenden *Contrast-images* (*con-files*) der einzelnen Versuchspersonen ($N = 33$) ausgewählt und zusammengefasst auf einer zweiten Ebene („*second-level analysis*“) analysiert (siehe Abschnitte 2.2.5.2.5. und 3.1.4.5.). Die Ergebnisse ermöglichen eine Generalisierung auf die Grundgesamtheit der rechtshändigen Männer im Alter zwischen 20 bis 40 Jahren.

[Fortsetzung Tabelle 21]

Aktivierungsort	BA	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Reimgenerierung minus Ruhe“</i>								
<i>p</i> -Schwellenwert = .001 (FWE-korrigiert); <i>t</i> = 7.54; minimale Clustergröße = 25 Voxels (<i>p</i> < .001); <i>N</i> = 33								
R/L Supp Mot Area	32	0	32	36	508	13.25	0.000	0.000
R SF Med	32	2	22	40		12.19	0.000	
R/L Mid Cing	6	-4	4	60		12.05	0.000	
R Insula	47	32	24	-4	559	13.13	0.000	0.000
R Inf F Tri	47	40	18	-2		12.87	0.000	
R Inf F Orb	38	56	18	-4		9.76	0.000	
R Inf F Oper								
L Insula	47	-32	26	-2	428	12.16	0.000	0.000
L Inf F Oper	48	-32	18	8		10.83	0.000	
L Inf F Orb	47	-40	22	0		10.55	0.000	

R = rechts; L = links; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Supp Mot Area = Supplementary Motor Area (SMA); SF Med = Superior Frontal Medial; Mid Cing = Middle Cingulum; BA = Brodmann Area

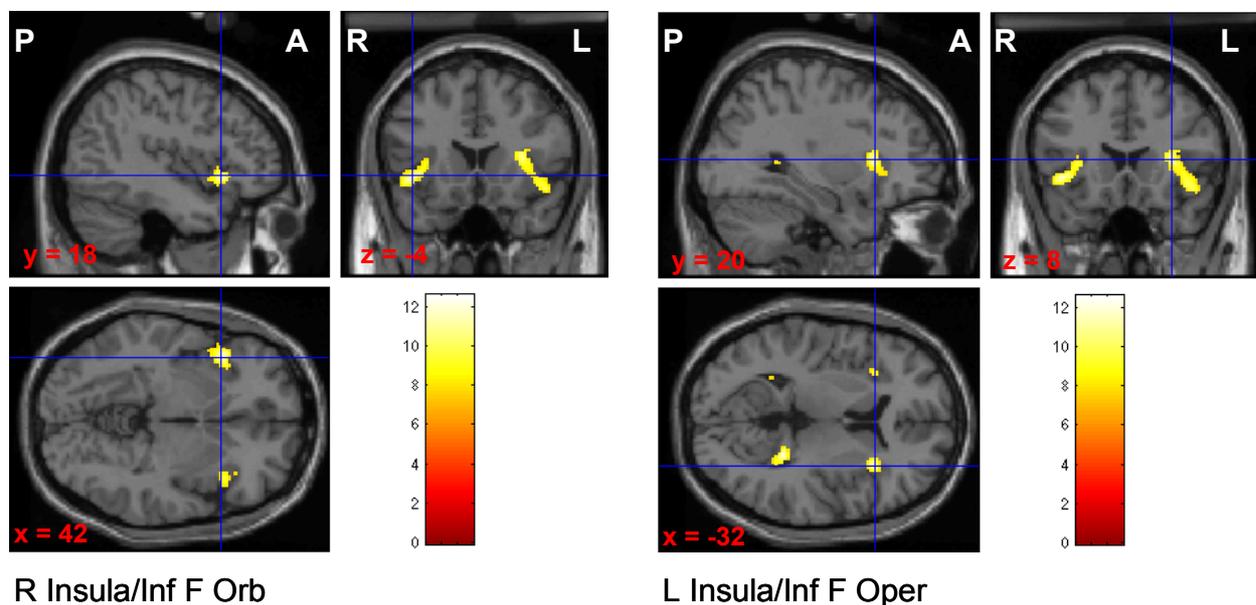


Abbildung 41: Aktivierungen Kontrast 1: „Wortgenerierung minus Ruhe“ (*N* = 33) (in die Ergebnisbetrachtung wurden ausschließlich frontale Regionen (*y*-Koordinate ≥ 0) mit aufgenommen; s. o.)

Bei der „*second-level analysis*“ für Kontrast 2 „Reimgenerierung minus Ruhe“ ergeben sich drei hochsignifikante Cluster (für jedes Cluster: $p < .0001$ korrigiert), ebenfalls bilateral der inferior-frontale Kortex einschließlich der insularen Region (inferior-frontaler Kortex/Insula rechtshemisphärisch: $t = 13.13$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*; inferior-frontaler Kortex/Insula linkshemisphärisch: $t = 12.16$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*) (siehe Abbildung 42).

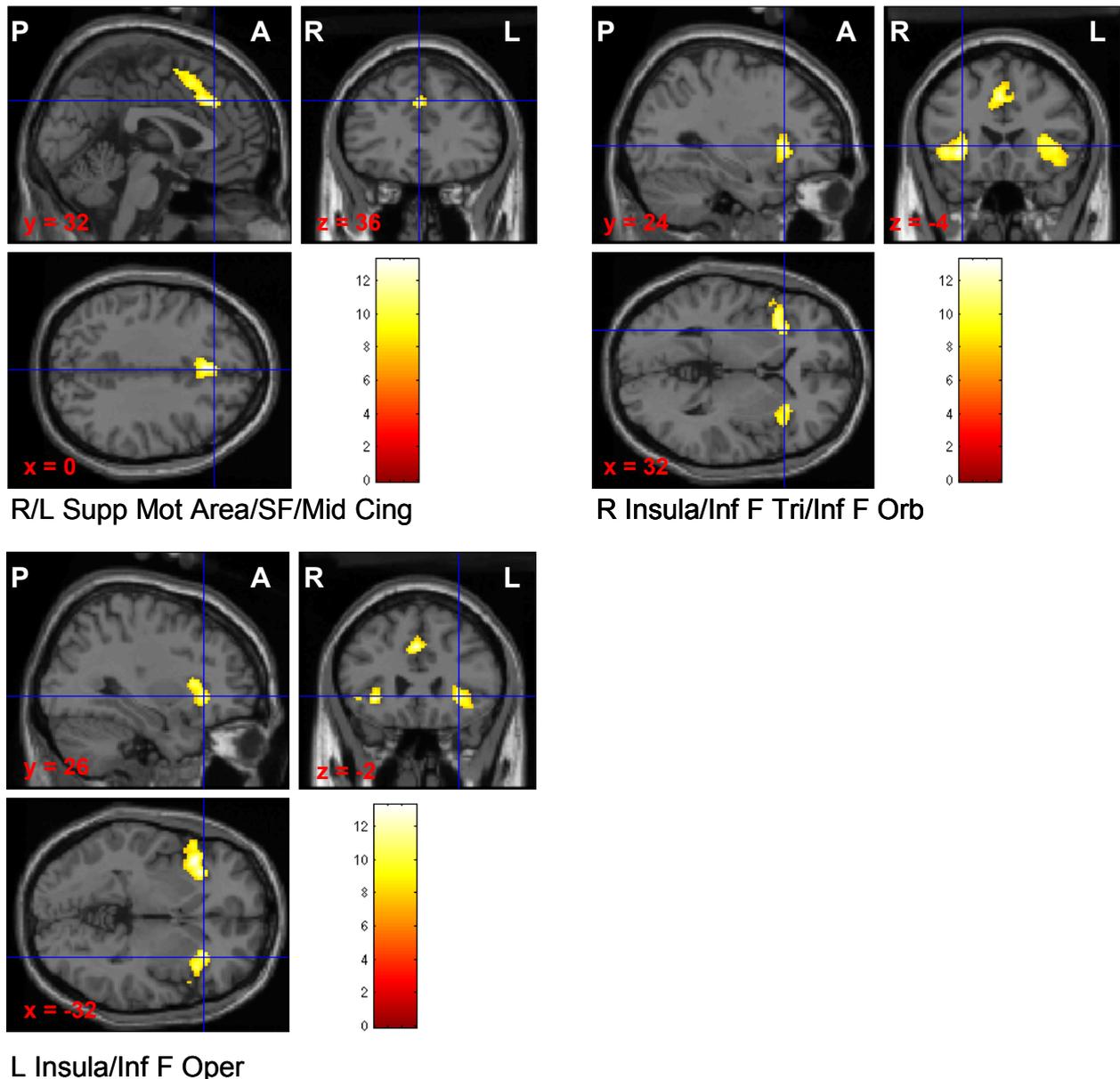


Abbildung 42: Aktivierungen Kontrast 2: „Reimgenerierung minus Ruhe“ ($N = 33$) (in die Ergebnisbetrachtung wurden ausschließlich frontale Regionen (y -Koordinate ≥ 0) aufgenommen; s. o.)

Ein drittes Cluster umfasst den supplementär-motorischen Kortex bilateral, den mittleren Gyrus Cinguli sowie den rechtshemisphärischen superior-frontalen medialen Kortex ($t = 13.25$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*). Bei der Anzahl zusammenhängender Voxels in den sprachassoziierten Clustern gibt es eine leichte Überlegenheit zu Gunsten der rechten Hemisphäre (siehe Tabelle 21).

4.1.2.3.2. Physiologische Aktivierung bei Kontrasten „Wort- minus Reimgenerierung“ (Kontrast 3) und „Reim- minus Wortgenerierung“ (Kontrast 4)

Kontrastiert man auf Gruppenebene Wort- mit Reimgenerierung, findet sich selbst bei sehr niedriger Signifikanzschwelle ($p < .05$ unkorrigiert) keine relevante sprachassoziierte Region.

Bei Kontrast 4 „Reim- minus Wortgenerierung“ lassen sich dagegen zwei signifikante, frontale, allerdings rechtshemisphärische Aktivierungscluster ausmachen (beide Cluster: $p < .0001$ korrigiert). Beide Regionen umfassen den mittleren Frontalkortex (MFG), einmal im Bereich um den rechtshemisphärischen inferior-frontalen Kortex (BA 44/45) und einmal eher im Grenzgebiet zum superior-frontalen Kortex (BA 9) (siehe Abbildung 43). Auf Voxel-Level ist allerdings nur das superior gelegene Cluster signifikant aktiviert ($t = 6.25$, $p = .038$ *FWE-korrigiert*) (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: *t*-Statistik Kontrast 4: „Reim- minus Wortgenerierung“

Aktivierungsort	BA	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Reim- minus Wortgenerierung“</i>								
p -Schwellenwert = .00001 (unkorrigiert); $t = 5.00$; minimale Clustergröße = 25 Voxels ($p < .001$); $N = 33$								
R MFG	9	44	22	48	34	6.25	0.038	0.000
R MFG	44	50	24	32	44	5.95	0.078	0.000
R Inf F Tri	44	46	28	38		5.46	0.227	
	45	42	24	28		5.32	0.303	

R = rechts; L = links; Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; MFG = Middle Frontal Gyrus; BA = Brodmann Area

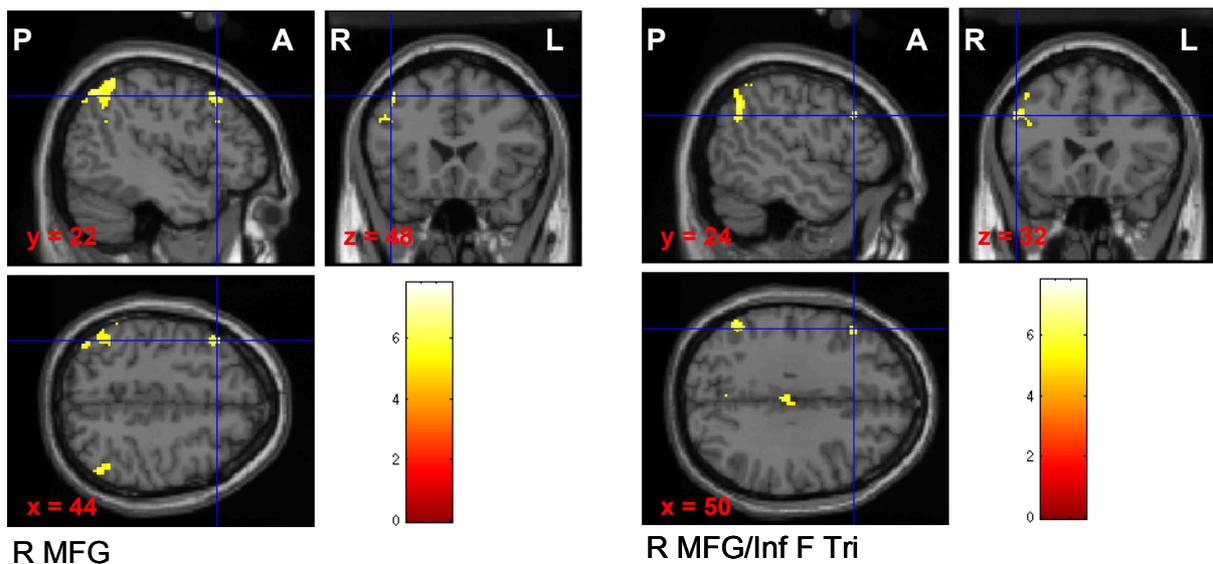


Abbildung 43: Aktivierungen Kontrast 4: „Reim- minus Wortgenerierung“ ($N = 33$) (in die Ergebnisbetrachtung wurden ausschließlich frontale Regionen (y -Koordinate ≥ 0) aufgenommen; s. o.)

4.1.2.3.3. Physiologische Aktivierung bei Kontrasten „Wortentscheidung minus Ruhe“ (Kontrast 5) und „Reiment-scheidung minus Ruhe“ (Kontrast 6)

Die Aktivierung bei Kontrast 5 „Wortentscheidung minus Ruhe“ deutet auf drei separate mit Sprachprozessen assoziierte Cluster hin (für jedes Cluster: $p < .0001$ korrigiert) (siehe Tabelle 23). Zwei Cluster liegen im rechtshemisphärischen inferior-frontalen Kortex (inferior-frontale Operculum sowie orbitaler Frontalkortex; $t = 7.48$, $p = .001$ *FWE-korrigiert* respektive $t = 7.18$, $p = .003$ *FWE-korrigiert*). Ein linkshemisphärisches Cluster umfasst den inferioren orbitalen Frontalkortex (BA 47), ist jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt als die rechtshemisphärischen Aktivierungen ($t = 7.02$, $p = .004$ *FWE-korrigiert*).

Tabelle 23: *t*-Statistik Kontraste 5 und 6 : „Wortentscheidung minus Ruhe“ und „Reimentscheidung minus Ruhe“

Aktivierungsort	BA	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Wortentscheidung minus Ruhe“</i>								
<i>p</i> -Schwellenwert = .05 (FWE-korrigiert); <i>t</i> = 6.09; minimale Clustergröße = 25 Voxels (<i>p</i> < .001); N = 33								
R Inf F Oper	48	44	10	24	152	7.48	0.001	0.000
R Precentral	6	56	8	34		6.98	0.005	
R Inf F Orb	47	34	24	-6	57	7.18	0.003	0.000
R Insula								
L Inf F Orb	47	-36	28	-6	25	7.02	0.004	0.000
<i>„Reimentscheidung minus Ruhe“</i>								
<i>p</i> -Schwellenwert = .001 (FWE-korrigiert); <i>t</i> = 7.54; minimale Clustergröße = 25 Voxels (<i>p</i> < .001); N = 33								
R Insula	47	34	26	-6	331	12.10	0.000	0.000
R Inf F Orb	47	30	20	0		11.07	0.000	
	47	44	20	-4		9.88	0.000	
L Insula	47	-38	22	-4	309	12.06	0.000	0.000
L Inf F Orb	38	-52	16	-4		8.25	0.000	
L Inf F Oper	44	-58	14	24	149	9.76	0.000	0.000
L Precentral	6	-56	8	44		9.11	0.000	
	44	-58	14	36		7.80	0.000	
R Supp Mot Area	6	2	12	54	106	9.66	0.000	0.000
	6	-6	2	60		8.73	0.000	
	32	6	16	44		8.40	0.000	
R Inf F Oper	44/	44	6	18	98	9.16	0.000	0.000
R Precentral	48							
	44	48	10	26		9.13	0.000	

R = rechts; L = links; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Supp Mot Area = Supplementary Motor Area (SMA); BA = Brodmann Area

Bei Kontrast 6 „Reimentscheidung minus Ruhe“ ergeben sich selbst bei einer deutlich höheren Signifikanzschwelle ($p < .001$, FWE-korrigiert) fünf große Cluster im frontalen Kortex (alle Cluster: $p < .0001$ korrigiert). Zwei der Cluster liegen in der linken Hemisphäre und umfassen die Insula-Region (BA 47) sowie das inferior-frontale Operculum des inferior-frontalen Kortex (BA 44) (Insula; $t = 12.06$, $p < .0001$, inferior-frontale

operculare Region: $t = 9.76$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*; siehe Tabelle 23). Die drei übrigen Cluster sind in der rechten Hemisphäre gelegen und umfassen das Gebiet der Insula (BA 47), das supplementär-motorische Areal (BA 6) sowie das inferior-frontale Operculum (BA 44) (Insula; $t = 12.10$, $p < .0001$, supplementär-motorisches Areal: $t = 9.66$, $p < .0001$; inferior-frontale Operculum: $t = 9.16$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*; siehe Tabelle 23).

4.1.2.3.4. Physiologische Aktivierung bei Kontrasten „Wort- minus Reimaufgaben“ (Kontrast 7) und „Reim- minus Wortaufgaben“ (Kontrast 8)

Beim Vergleich der beiden Wort- (Generierung *und* Entscheidung) mit den beiden Reimbedingungen (ebenfalls Generierung *und* Entscheidung) findet sich ein signifikantes, linkslateralisiertes Cluster ($p < .0001$ korrigiert) im Gyrus Rectus (BA 11) ($t = 9.03$, $p < .0001$ *FWE-korrigiert*), welches sich bis in den medialen orbitalen Frontalkortex erstreckt (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: *t*-Statistik Kontraste 7 und 8: „Wort- minus Reimaufgaben“ und „Reim- minus Wortaufgaben“

Aktivierungsort	BA	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Wort- minus Reimaufgaben“</i>								
p -Schwellenwert = .05 (<i>FWE-korrigiert</i>); $t = 6.16$; minimale Clustergröße = 25 Voxels ($p < .001$); $N = 33$								
L Rectus	11	6	40	-16	74	9.03	0.000	0.000
L Med F Orb								
<i>„Reim- minus Wortaufgaben“</i>								
p -Schwellenwert = .05 (<i>FWE-korrigiert</i>); $t = 6.16$; minimale Clustergröße = 25 Voxels ($p < .001$); $N = 33$								
L MFG	45	-44	56	6	32	8.31	0.000	0.000
	46	-50	48	0		6.47	0.020	
L Precentral	44	-50	8	36	60	7.79	0.001	0.000
	6	-54	4	42		6.71	0.010	

R = rechts; L = links; Med F Orb = Medial Frontal Orbital; MFG = Middle Frontal Gyrus; BA = Brodmann Area

Im umgekehrten Fall (Reim- minus Wortaufgaben) ergeben sich zwei linkslateralisierte, hochsignifikante Cluster (beide Cluster: $p < .0001$ korrigiert), einmal im mittleren Frontalkortex (BA 45/46) und einmal im präzentralen Kortex (BA 44/6) (MFG: $t = 8.31$, $p < .001$; präzentraler Kortex: $t = 7.79$, $p = .001$ FWE-korrigiert, siehe Tabelle 24).

4.1.2.3.5. Physiologische Aktivierung bei Kontrasten „Generierung minus Entscheidung“ (Kontrast 9) und „Entscheidung minus Generierung“ (Kontrast 10)

Beim Kontrastieren der beiden Generierungsaufgaben mit den beiden Entscheidungsaufgaben (Kontrast 9) zeigen sich drei relevante Cluster (alle Cluster: $p < .0001$ korrigiert) (siehe Tabelle 25). Das größte Cluster liegt rechtshemisphärisch in der Insula-Region (BA 47) und erstreckt sich bis zum superioren temporalen Pol sowie zum inferior-frontalen Operculum ($t = 10.09$, $p < .0001$ korrigiert). Die beiden linkslateralisierten Cluster umfassen die insulare Region (BA 48) einschließlich des inferioren orbitalen Frontalkortex (BA 47) sowie den Gyrus Cinguli (Insula: $t = 8.90$, $p < .001$; Gyrus Cinguli: $t = 7.56$, $p = .001$ FWE-korrigiert).

Tabelle 25: *t*-Statistik Kontraste 9 und 10: „Generierung minus Entscheidung“ und „Entscheidung minus Generierung“

Aktivierungsort	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level	
	BA	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Generierungs- minus Entscheidungsaufgaben“</i>								
<i>p</i> -Schwellenwert = .05 (FWE-korrigiert); $t > 6.11$; minimale Clustergröße = 25 Voxels ($p < .001$); $N = 33$								
R Insula	47/48	46	14	-6	239	10.09	0.000	0.000
R Sup Tem Pole								
R Inf F Oper	48	34	18	10		7.02	0.004	
L Insula	48	-34	18	8	223	8.90	0.000	0.000
L Inf F Orb	47	-44	20	-4		8.00	0.000	
	38	-54	16	-4		6.86	0.007	
L Mid Cing		-6	22	34	60	7.56	0.001	0.000

[Fortsetzung Tabelle 25]

Aktivierungsort	BA	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Entscheidungs- minus Generierungsaufgaben“</i>								
<i>p-Schwellenwert = .05 (FWE-korrigiert); t > 6.11; minimale Clustergröße = 25 Voxels (p < .001); N = 33</i>								
R Med F Orb	11	4	60	-12	161	9.44	0.000	0.000
R/L Rectus	11	0	56	-18		8.66	0.000	
	11	-6	48	-16		6.37	0.027	
L/R Caudate	25	6	14	-6	165	9.05	0.000	0.000
	25	-8	12	-8		8.14	0.000	
R Olfactory	25/	18	12	-14	41	9.04	0.000	0.000
R Putamen	11							
R Precentral	44	46	6	34	158	8.90	0.000	0.000
R Inf F Tri	48	42	20	30		7.52	0.001	
R Inf F Oper								
R SF Med	10	10	68	22	79	7.64	0.001	0.000
R SFG	10	-2	66	22		7.59	0.001	
	10	12	68	14		7.38	0.002	

R = rechts; L = links; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; SF Med = Superior Frontal Medial; SFG = Superior Frontal Gyrus; Mid Cing = Middle Cingulum; BA = Brodmann Area

Der Kontrast „Entscheidungs- minus Generierungsaufgaben“ lässt in der Gruppenanalyse fünf separate, eher rechtslateralisierte frontale Cluster erkennen (alle Cluster: $p < .0001$ korrigiert) (siehe Tabelle 25). Die drei größeren Cluster umfassen den medialen frontalen orbitalen Kortex (BA 11, eher rechtshemisphärisch) und Gyrus Rectus (BA 11, bilateral), den Nucleus Caudatus (BA 25, bilateral) sowie den präzentralen Kortex (BA 44/48, rechtshemisphärisch) (medialer frontaler orbitaler Kortex: $t = 9.44$, $p < .0001$; Nucleus Caudatus: $t = 9.05$, $p < .0001$; präzentraler Kortex: $t = 8.90$, $p < .0001$ FWE-korrigiert). Zwei kleinere aktivierte Regionen liegen im olfaktorischen Kortex (BA 25/11, rechtshemisphärisch) sowie im superioren medialen Frontalkortex (BA 10, rechtshemisphärisch) (olfaktorischer Kortex: $t = 9.04$, $p < .0001$; superiorer medialer Frontalkortex: $t = 7.64$, $p = .0001$ FWE-korrigiert).

4.1.2.3.6. Physiologische Aktivierung bei Kontrast „Interaktion“ (Kontrast 11)

Bei der Berechnung der Interaktion (siehe Abschnitte 2.2.4.2.2. und 3.1.3.3.) findet sich auf Gruppenebene nur ein signifikantes Cluster ($p = .0001$ korrigiert) im linken superioren Frontalkortex (BA 46/9) (SFG: $t = 5.63$, $p < .001$ unkorrigiert) (siehe Abbildung 44). Drei weitere Cluster erreichen das Signifikanzlevel auf Clusterebene nur unkorrigiert (der linke superior-frontale Kortex, der bilaterale superior-frontale mediale Kortex sowie der rechte superiore Frontalkortex; siehe Tabelle 26 und Abbildung 44).

Tabelle 26: *t*-Statistik Kontrast 11: „Interaktion“

Aktivierungsort	BA	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster- Level
		x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE- korr.)	p-Wert (korr.)
<i>„Interaktion“</i>								
p -Schwellenwert = .001 (unkorrigiert); $t > 3.37$; minimale Clustergröße = 25 Voxels ($p = .057$); $N = 33$								
L SFG	46	-24	58	32	181	5.63	0.149	0.001
L SF Med	9	-16	54	44		4.50	0.892	
	9	-6	46	36		3.87	1.000	
L SFG	9/8	-22	34	54	35	4.92	0.575	0.472
R/L SF Med	10	0	58	2	55	4.61	0.828	0.166
R SFG	9	14	42	50	38	4.27	0.975	0.407
	9	18	34	52		3.80	1.000	

R = rechts; L = links; SF Med = Superior Frontal Medial; SFG = Superior Frontal Gyrus; BA = Brodmann Area

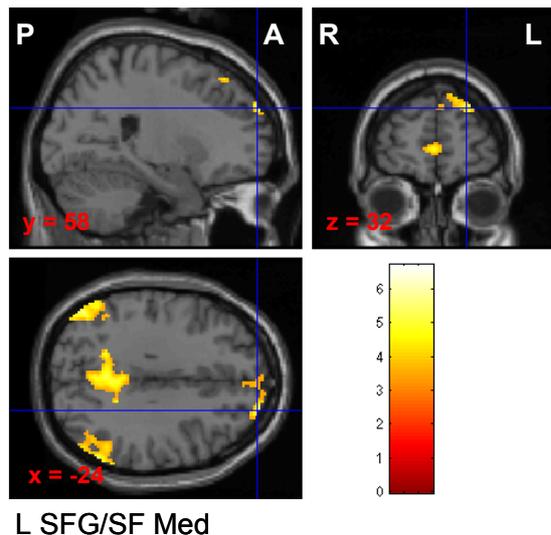


Abbildung 44: Aktivierungen Kontrast 11: „Interaktion“ (in die Ergebnisbeurteilung wurden ausschließlich frontale Regionen (y-Koordinate ≥ 0) aufgenommen; s. o.)

4.1.2.4. Region-of-Interest Analysen und Lateralitätsbestimmung auf Gruppenebene

4.1.2.4.1. Nach Fernández-Ansatz

Die Lateralitätsindizes der verschiedenen Kontraste unterscheiden sich (wie schon auf der Versuchspersonenebene; siehe Abschnitt 4.1.2.2) auch auf der Gruppenebene kaum. Für den Kontrast 1 „Wortgenerierung minus Ruhe“ ergibt sich in Abhängigkeit vom gewählten ROI-Radius ein Lateralitätsindex von $fMRT-LI_{\text{Fernández}} = .12$ bis $.14$. Für die Reimgenerierungsbedingung (Kontrast 2) zeigt sich ein noch niedrigerer Wert ($fMRT-LI_{\text{Fernández}} = .09$ bis $.12$) und mit abfallender Tendenz je größer der Radius gewählt wird.

4.1.2.4.2. Nach Voxelcount-Ansatz

Die Ergebnisse nach dem Voxelcount-Ansatz variieren stärker mit der Größe des ROI-Radius als bei der Fernández-Berechnung. Beim kleinsten ROI-Radius (10 mm) liegen die Werte in Abhängigkeit vom gewählten Signifikanzniveau¹² zwischen $fMRT-LI_{\text{Voxelcount}}$

¹² $fMRT-LI_{\text{Voxelcount}}$ wurde für neun verschiedene Signifikanzniveaus zwischen $p < .10$ und $p < .001$ (FWE) berechnet (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.)

= .01 bis .07 für die Wortgenerierung und sogar teilweise im negativen Bereich bei der Reimgenerierung ($fMRT-LI_{Voxelcount} = -.05$ bis $.01$). Bei der Voxelcount-Berechnung mit dem ROI-Radius 20 mm liegen die Lateralitätsindizes (wieder in Abhängigkeit vom gewählten Signifikanzniveau) für die Wortgenerierung zwischen $fMRT-LI_{Voxelcount} = .07$ bis $.11$ und für die Reimgenerierung zwischen $fMRT-LI_{Voxelcount} = .00$ bis $.07$. Bei der Analyse für den größten ROI-Radius (30 mm) variieren die $fMRT-LI$ -Werte bei der Wortgenerierung nur noch minimal zwischen den verschiedenen Signifikanzschwellen ($fMRT-LI_{Voxelcount} = .21$ bis $.24$) und zeigen gleichzeitig, nach Berechnung der Lateralität mit dem Voxelcount-Ansatz, die stärkste Hemisphärendominanz an. Bei der Reimgenerierung liegen die $fMRT-LI$ -Werte zwischen $fMRT-LI_{Voxelcount} = .09$ bis $.19$. Über alle drei ROI-Radien hinweg findet sich eine signifikant stärkere Lateralität unter der Wortgenerierungsaufgabe (t -Test für abhängige Stichproben: $t_{10} = 3.33$, $p < .01$; $t_{20} = 7.46$, $p < .001$; $t_{30} = 6.25$, $p < .001$).

4.2. Ergebnisse der funktionellen TCD in der Gesamtgruppe

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der funktionellen transkraniellen Dopplersonographie bezüglich der Sprachlateralisation bei Wort- und Reimgenerierung für die Gesamtstichprobe ($N = 27$) (siehe Abschnitt 3.2.1.3.) vergleichend dargestellt.

4.2.1. Leistungsaspekte (fTCD)

Abbildung 45 zeigt die gemittelte Anzahl der Tastendrucke während der Messung, aufgeschlüsselt nach Versuchspersonen. Die Anzahl der mental generierten Wörter in der Wortgenerierungsbedingung ($M = 8.89$; $Min = 5.35$; $Max = 16.30$) unterscheidet sich dabei signifikant von der Anzahl der mental generierten Wörter in der Reimgenerierungsbedingung ($M = 4.33$; $Min = 2.63$; $Max = 8.90$) (t -Test für abhängige Stichproben: $t = 23.32$; $p < .001$). Genau wie in Abschnitt 4.1.1.1. (Leistungsaspekte fMRT), liegt auch bei der fTCD-Untersuchung nur eine Versuchsperson (ebenso Vp 30) in der Anzahl mental generierter Wörter/Reime mehr als zwei Standardabweichungen ($SD_{WG} = 2.25$; $SD_{RG} = 1.25$) entfernt vom Mittelwert der Gesamtgruppe (siehe Abbildung 45). Die

Anzahl mental generierter Wörter/Reime korreliert in beiden Bedingungen hoch signifikant mit der Anzahl laut ausgesprochener Wörter/Reime (Wortgenerierung: $r = .53$, $p = .004$; Reimgenerierung: $r = .75$, $p < .0001$).

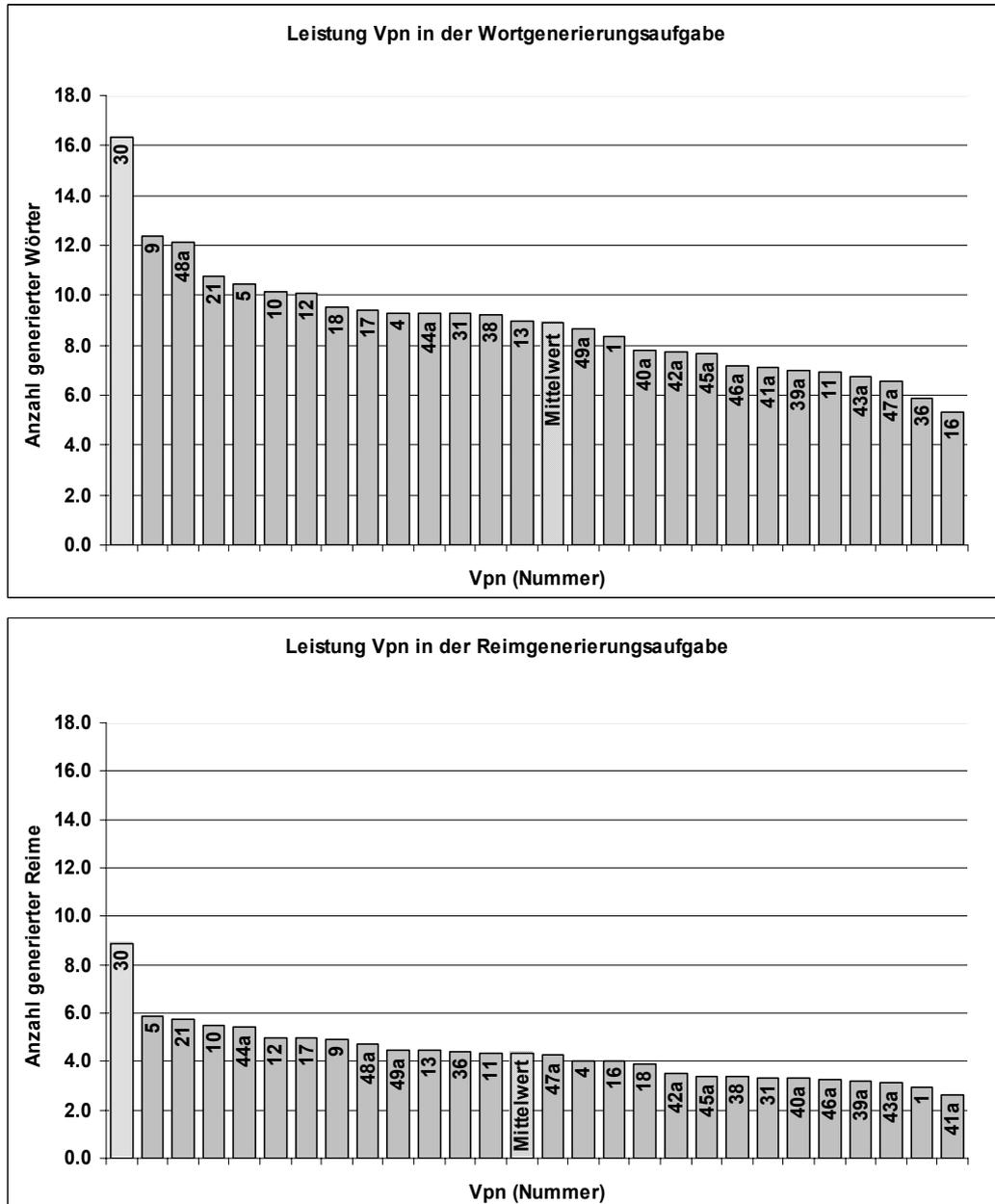


Abbildung 45: Anzahl der Tastendrucke pro Versuchsperson während der Wort- und Reimgenerierung ($N = 27$)

4.2.2. Physiologische Messwerte (fTCD)

4.2.2.1. Blutfluss linke und rechte Hemisphäre

Bei der Betrachtung der Blutflussveränderungen in beiden Hemisphären zeigt sich, dass nur in der linken Hemisphäre ein Anstieg vom CUE- zum GEN-Intervall zu beob

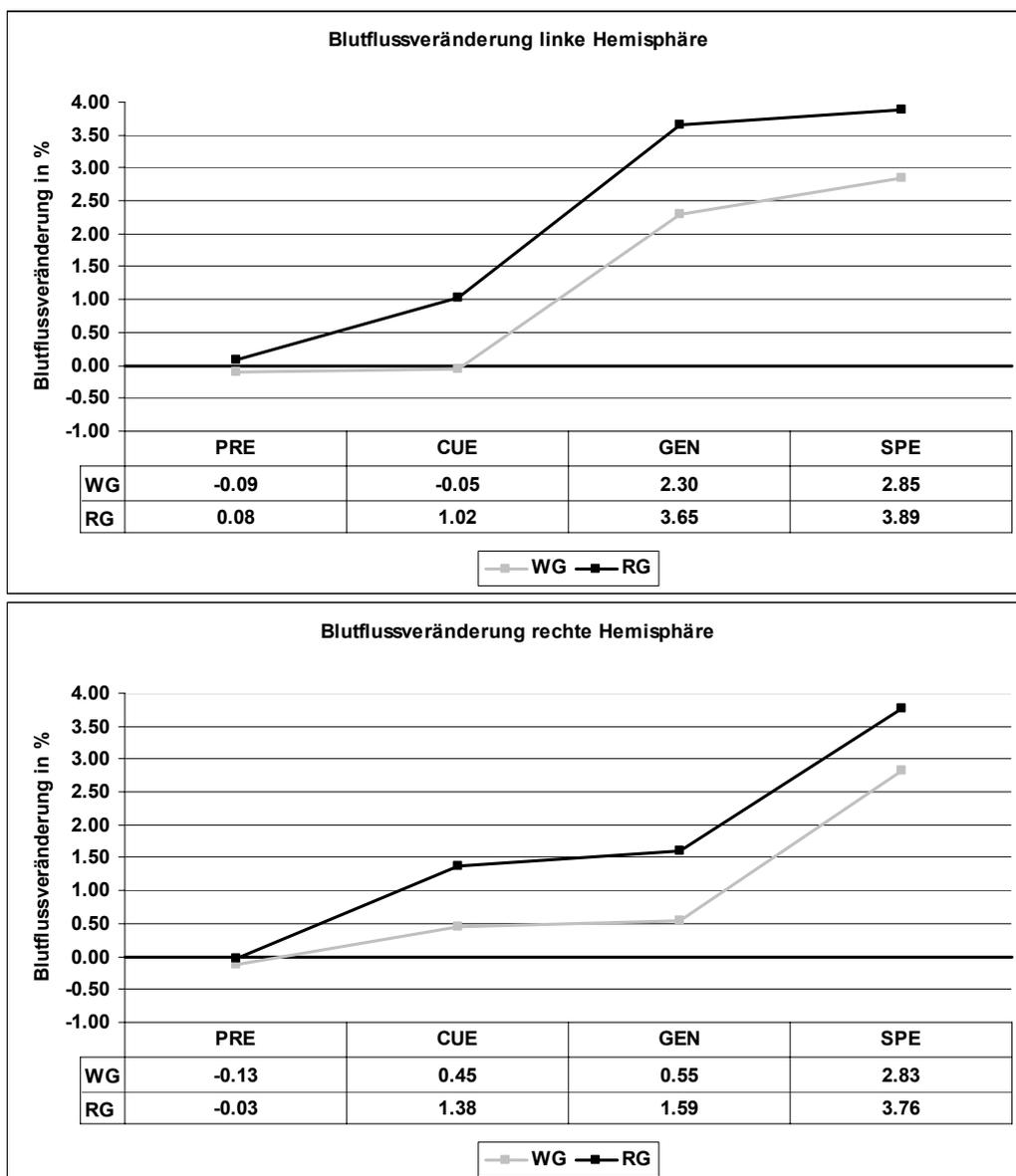


Abbildung 46: Blutflussveränderung in linker und rechter Hemisphäre über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung ($N = 27$)

achten ist (*t*-Test für abhängige Stichproben: Wortgenerierung_{LH}: $t = 3.26$, $p = .003$; Reimgenerierung_{LH}: $t = 3.55$, $p = .001$; Wortgenerierung_{RH}: $t = 0.01$, $p = .894$; Reimgenerierung_{RH}: $t = 0.30$, $p = .767$). Die Testung auf Unterschiede zwischen beiden Bedingungen ergibt nur für das CUE-Intervall der linken Hemisphäre ein signifikantes Ergebnis (CUE_{LH}: $t = 2.09$, $p = .046$), für das GEN-Intervall ist trotz der deutlichen Mittelwertsunterschiede lediglich ein Trend zur stärkeren Durchblutungsbeschleunigung in der linken Hemisphäre zu beobachten (GEN_{LH}: $t = 1.71$, $p = .100$) (siehe Abbildung 46).

4.2.2.2. fTCD-Aktivierungsindex (fTCD-AI)

Der Aktivierungsindex lässt einen kontinuierlichen Anstieg der Blutflussgeschwindigkeit über alle vier Intervalle erkennen, der allerdings nur vom CUE- zum GEN-Intervall in der Reimbedingung signifikant wird (Anstieg CUE-GEN_{WG}: $t = 1.70$, $p = .101$; CUE-GEN_{RG}: $t = 2.27$, $p = .032$; siehe Abbildung 47). Im Vergleich zwischen den beiden Bedingungen zeigt sich nur im GEN-Intervall ein etwas deutlicherer Mittelwertsunterschied, der jedoch nur als Trend bezeichnet werden kann (GEN-Intervall_{WG vs. RG}: $t = 1.71$, $p = .100$).

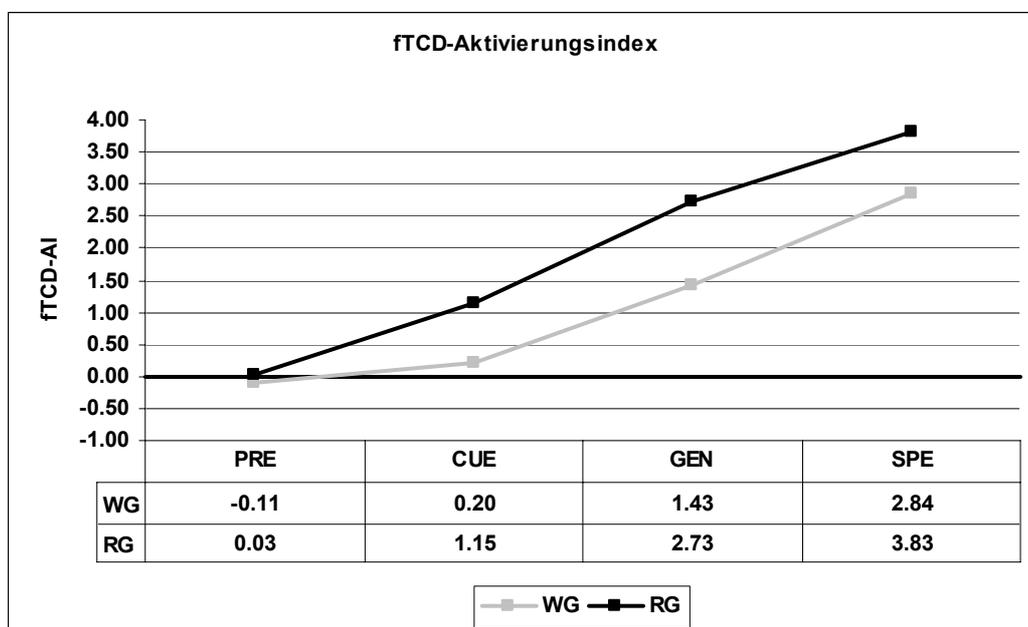


Abbildung 47: fTCD-Aktivierungsindex (fTCD-AI) über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung ($N = 27$)

4.2.2.3. fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI)

Aus Abbildung 48 ist zu erkennen, dass die Lateralitätsindizes beider Bedingungen parallel verlaufen, die Reimgenerierung jedoch bis auf das SPE-Intervall etwas höhere Mittelwerte aufweist. Der Mittelwertsunterschied zwischen beiden Bedingungen, getestet mittels *t*-Test für abhängige Stichproben, erreicht in keinem Intervall die Signifikanzgrenze (*t*-Test für abhängige Stichproben: $PRE_{WG}-PRE_{RG}$: $t = 1.55$, $p = .133$; $CUE_{WG}-CUE_{RG}$: $t = 0.65$, $p = .520$; $GEN_{WG}-GEN_{RG}$: $t = 1.28$, $p = .212$; $SPE_{WG}-SPE_{RG}$: $t = 0.34$, $p = .733$). Der Anstieg des Lateralitätsindex vom CUE- zum GEN-Intervall ist für beide Bedingungen hoch signifikant (*t*-Test für abhängige Stichproben: $CUE_{WG}-GEN_{WG}$: $t = 7.31$, $p < .0001$; $CUE_{RG}-GEN_{RG}$: $t = 7.17$, $p < .0001$).

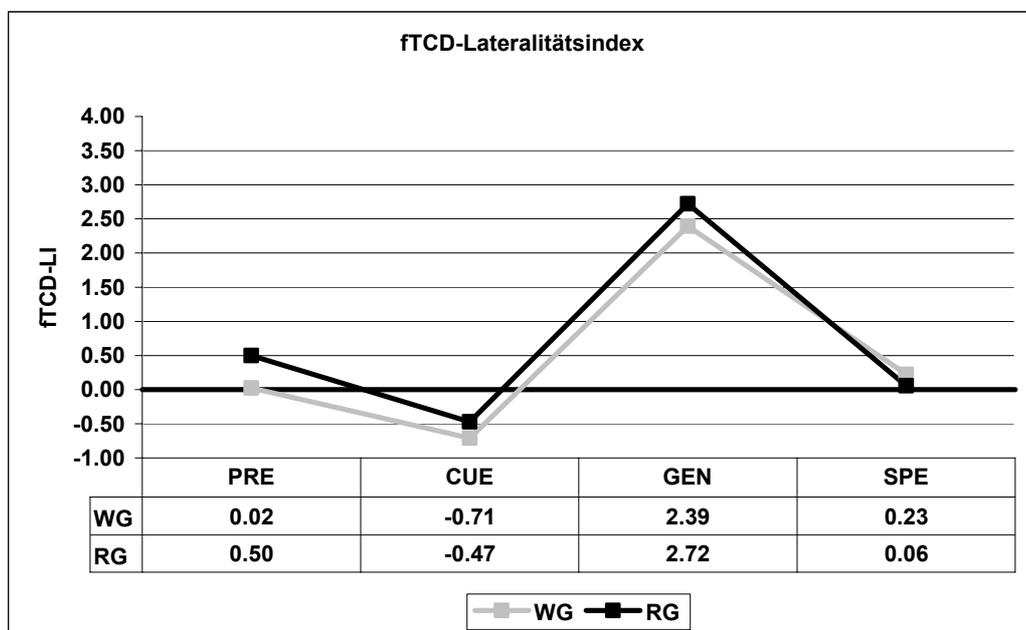


Abbildung 48: fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung ($N = 27$)

4.3. fMRT- und fTCD-Daten in der Substichprobe

Die folgenden Analysen anhand der Versuchspersonen ($N = 16$), die zu beiden Zeitpunkten an der Untersuchung teilgenommen haben (siehe Abschnitt 3.2.1.3.), ermöglichen einen direkten Vergleich beider Bildgebungsverfahren bei der Vorhersage der

sprachdominanten Hemisphäre. Die Ergebnisse werden vergleichend im Hinblick auf die Sprachlateralisation unter Wort- und Reimgenerierungsbedingung berichtet.

4.3.1. fMRT-Daten in der Substichprobe

4.3.1.1. Leistungsaspekte (fMRT)

Die durchschnittliche Anzahl mental generierter Wörter in der Substichprobe der Versuchspersonen, die sowohl an der fMRT- als auch an der fTCD-Messung teilgenommen haben, beträgt für die fMRT-Messung $M = 8.99$ ($SD = 2.30$). Die durchschnittliche Anzahl generierter Reime liegt bei $M = 5.16$ ($SD = 1.63$). Auch in dieser Substichprobe ($N = 16$) unterscheiden sich die Anzahl generierter Wörter und Reime also signifikant voneinander (*t-Test* abhängige Stichproben: $t = 12.21$, $p < .0001$).

4.3.1.2. Physiologische Messwerte (fMRT)

In der Substichprobe ($N = 16$) liegt der Mittelwert des Lateralitätsindex (nach Fernández) unter jeder Bedingung (Wort- und Reimgenerierung) und unter verschiedenen ROI-Radien im positiven Bereich (WG₁₀: fMRT-LI = .16, WG₂₀: fMRT-LI = .20, WG₃₀: fMRT-LI = .17; RG₁₀: fMRT-LI = .18, RG₂₀: fMRT-LI = .16, RG₃₀: fMRT-LI = .15). Die Korrelation zwischen den Lateralitätsindizes der Wort- und Reimgenerierung wird nach dem Fernández-Ansatz nur für die ROI-Radien 20 mm und 30 mm signifikant (Nach Fernández: $r_{WG/RG10} = .43$, $p = .094$; $r_{WG/RG20} = .61$, $p = .012$; $r_{WG/RG30} = .58$, $p = .019$).

Bei der Berechnung der Lateralitätsindizes nach dem Voxelcount-Ansatz (siehe Abschnitte 2.2.5.3.3 und 3.1.4.6.2.) zeigt sich ein ähnliches Bild (WG₁₀: fMRT-LI = .15, WG₂₀: fMRT-LI = .26, WG₃₀: fMRT-LI = .35; RG₁₀: fMRT-LI = .11, RG₂₀: fMRT-LI = .25, RG₃₀: fMRT-LI = .34), allerdings nimmt die Lateralisation unter beiden Bedingungen mit größer werdenden ROI-Radien deutlich zu. Im Unterschied zum Fernández-Ansatz werden nach dem Voxelcount-Ansatz die Korrelationen zwischen den Lateralitätsindizes der Wort- und Reimgenerierung über alle drei ROI-Radien signifikant (Nach Voxelcount-Ansatz: $r_{WG/RG10} = .82$, $p < .0001$; $r_{WG/RG20} = .62$, $p = .010$; $r_{WG/RG30} = .60$, $p = .015$).

4.3.2. fTCD-Daten in der Substichprobe

4.3.2.1. Leistungsaspekte (fTCD)

Die durchschnittliche Anzahl mental generierter Wörter in der Substichprobe der Versuchspersonen, die sowohl an der fMRT- als auch an der fTCD-Messung teilgenommen haben, beträgt für die fTCD-Messung $M = 9.51$ ($SD = 2.53$). Die durchschnittliche Anzahl generierter Reime liegt bei $M = 4.73$ ($SD = 1.39$). Auch in dieser Substichprobe ($N = 16$) unterscheidet sich also die Anzahl generierter Wörter und Reime signifikant voneinander (t -Test abhängige Stichproben: $t = 10.93$, $p < .0001$).

4.3.2.2. Physiologische Messwerte (fTCD)

Wie in der Gesamtgruppe (s. o.) zeigt sich auch für die Substichprobe ($N = 16$) ein ähnliches Muster der Durchblutungsbeschleunigung über die vier Intervalle (siehe Abbildung 49). Die Mittelwertsunterschiede zwischen beiden Bedingungen, getestet mittels t -Test für abhängige Stichproben, erreichen auch hier in keinem Intervall die Signifikanzgrenze.

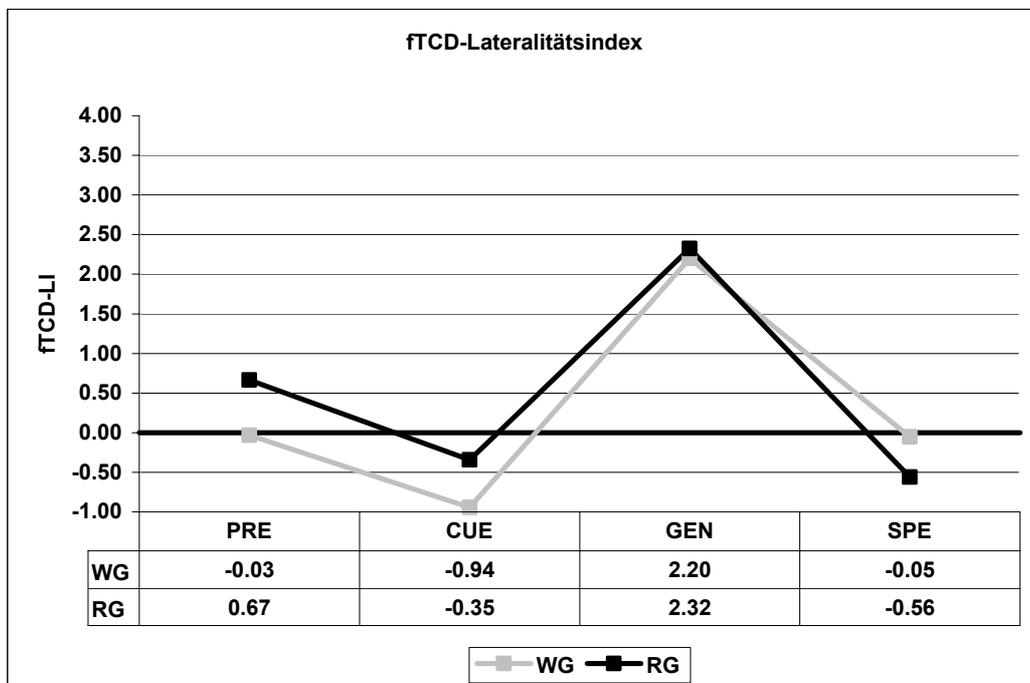


Abbildung 49: fTCD-LI über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung in der Substichprobe ($N = 16$)

Der Anstieg des Lateralitätsindex vom CUE- zum GEN-Intervall ist für beide Bedingungen hoch signifikant (*t*-Test für abhängige Stichproben: $CUE_{WG}-GEN_{WG}$: $t = 5.04$, $p < .0001$; $CUE_{RG}-GEN_{RG}$: $t = 4.61$, $p < .0001$).

4.3.3. Vergleich der Daten zwischen der fMRT- und der fTCD-Studie in der Substichprobe

4.3.3.1. Vergleich der Leistungsparameter

Der Vergleich der Leistungsdaten zeigt, dass unabhängig von der Erhebungsmethode (fMRT- oder fTCD-Messung) eine recht hohe Übereinstimmung in den Ergebnissen (Anzahl mental generierter Wörter/Reime) vorliegt ($r_{WGfMRT/fTCD}$: .69, $p = .003$; $r_{RGfMRT/fTCD}$: .60, $p = .014$). Weder bei der Wortgenerierungs- noch bei der Reimgenerierungsaufgabe ergeben sich signifikante Unterschiede in der Leistung, wenn die Ergebnisse der beiden Erhebungsmethoden miteinander verglichen werden (*t*-Test für abhängige Stichproben: $t_{WG} = 1.11$, $p = .286$; $t_{RG} = 1.34$, $p = .199$).

4.3.3.2. Vergleich der physiologischen Daten

Um beide Methoden (fMRT und fTCD) besser miteinander vergleichen zu können, wurde aus den drei nach Fernández berechneten fMRT-Lateralitätsindizes (ROI-Radien: 10 mm, 20 mm und 30 mm) ein gemittelter Lateralitätsindex (fMRT-LI_{Fernández}) gebildet (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.). Die Korrelation der physiologischen Daten (fMRT-LI_{Fernández} und fTCD-LI) wird unter keiner Bedingung signifikant ($r_{WGfMRT/fTCD}$: -.06, $p = .821$; $r_{RGfMRT/fTCD}$: -.04, $p = .897$). Die Übereinstimmung beider Methoden in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre ist, wie aus Abbildung 50 zu erkennen, dennoch hoch (Wortgenerierung: 87.5%; Reimgenerierung 81.3%). Bei nur zwei Versuchspersonen (Vpn 18 und 36) in der Wortgenerierungsbedingung und bei drei Versuchspersonen (Vpn 13, 16 und 36) in der Reimgenerierungsbedingung wären aufgrund der Lateralitätsindizes (fMRT-LI_{Fernández} und fTCD-LI) unterschiedliche Vorhersagen bezüglich der Sprachdominanz getroffen worden (siehe Tabelle 27).

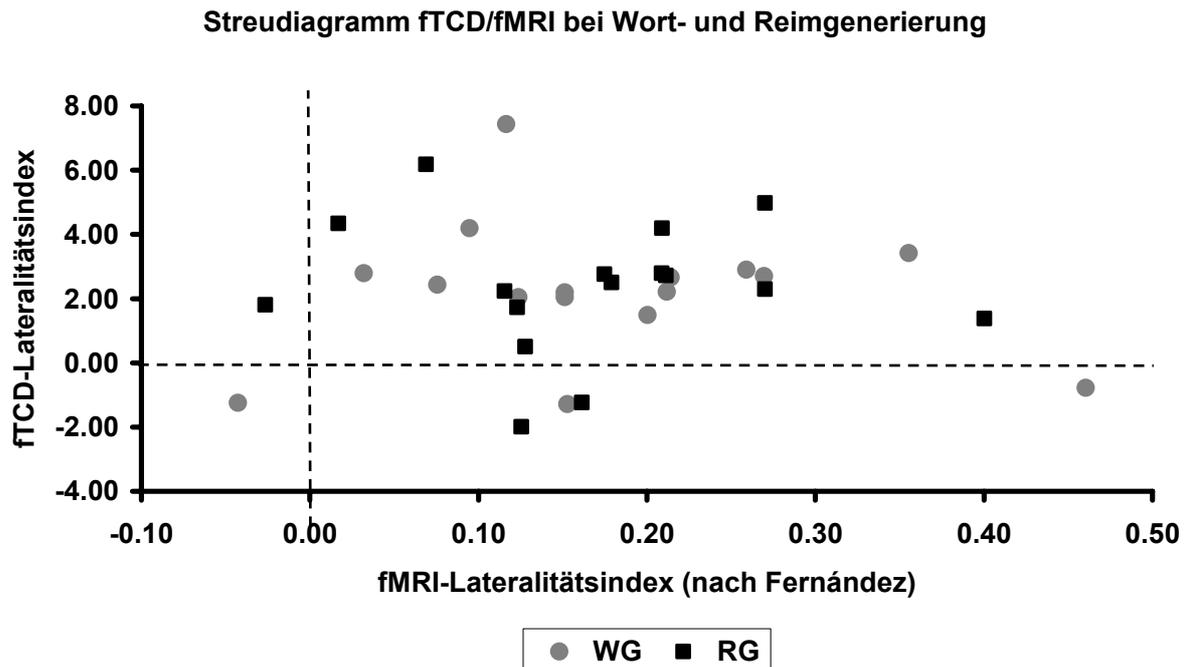


Abbildung 50: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen fMRT-LI_{Fernández} und fTCD-LI

Der Vergleich der fTCD-Daten mit den nach dem Voxelcount-Ansatz berechneten fMRT-Lateralitätswerten (gemittelter Wert über alle drei ROI-Radien, siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) zeigt ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 51). Auch hier wird die Korrelation der physiologischen Daten (fMRT-LI_{Voxelcount} und fTCD-LI) unter keiner Bedingung signifikant ($r_{WGfMRT/fTCD} = .07$, $p = .793$; $r_{RGfMRT/fTCD} = .29$, $p = .297$). Die Übereinstimmung beider Methoden in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre ist jedoch, wie aus Abbildung 51 zu erkennen, ähnlich hoch (Wortgenerierung: 81.3%; Reimgenerierung 81.3%) wie die Übereinstimmung zwischen fTCD-LI und dem fMRT-LI berechnet nach dem Fernández-Ansatz (siehe vorheriger Absatz). Pro Aufgabenbedingung (WG und RG; siehe Abbildung 51) gibt es bei drei Versuchspersonen eine mangelnde Übereinstimmung bezüglich der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre (Wortgenerierung: Vpn 10, 16 und 18; Reimgenerierung: Vpn 13, 16 und 36; siehe Tabelle 27).

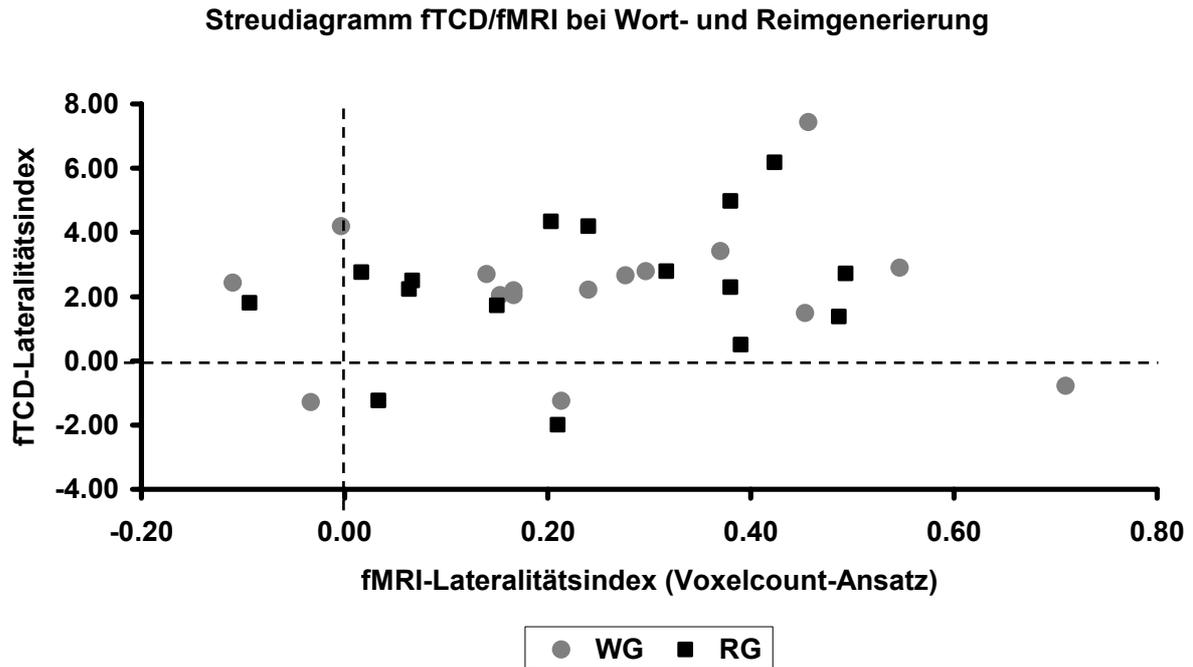


Abbildung 51: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen $fMRT-LI_{Voxelcount}$ und fTCD-LI

Tabelle 27: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen fTCD-LI, $fMRT-LI_{Fernández}$ und $fMRT-LI_{Voxelcount}$ bei Wort- und Reimgenerierung

<u>Wortgenerierung</u>			
Vp	fTCD-LI	$fMRT-LI_{Fernández}^*$	$fMRT-LI_{Voxelcount}^*$
1	2.79	0.03	0.30
4	2.19	0.15	0.17
5	1.49	0.20	0.45
9	2.04	0.15	0.17
10	2.43	0.08	-0.11
11	2.70	0.27	0.14
12	7.43	0.12	0.46
13	4.19	0.09	0.00
16	-1.25**	-0.04	0.21
17	2.21	0.21	0.24
18	-0.78	0.46	0.71
21	3.42	0.36	0.37
30	2.04	0.12	0.15

[Fortsetzung Tabelle 27]

Vp	fTCD-LI	<u>Wortgenerierung</u>	
		fMRT-LI _{Fernández} *	fMRT-LI _{Voxelcount} *
31	2.66	0.21	0.28
36	-1.29	0.15	-0.03
38	2.90	0.26	0.55

*Gemittelter fMRT-LI_{Fernández} sowie fMRT-LI_{Voxelcount} (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.)**negative LI-Werte **fett** und *kursiv* markiert

Vp	fTCD-LI	<u>Reimgenerierung</u>	
		fMRT-LI _{Fernández} *	fMRT-LI _{Voxelcount} *
1	1.73	0.12	0.15
4	2.29	0.27	0.38
5	0.50	0.13	0.39
9	4.98	0.27	0.38
10	2.50	0.18	0.07
11	2.76	0.17	0.02
12	6.18	0.07	0.42
13	1.81	-0.03	-0.09
16	-1.99**	0.13	0.21
17	2.23	0.12	0.06
18	1.38	0.40	0.49
21	2.72	0.21	0.49
30	2.79	0.21	0.32
31	4.19	0.21	0.24
36	-1.24	0.16	0.03
38	4.34	0.02	0.20

*Gemittelter fMRT-LI_{Fernández} sowie fMRT-LI_{Voxelcount} (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.)**negative LI-Werte **fett** und *kursiv* markiert

5. DISKUSSION

5.1. Diskussion der Hypothesen zur funktionellen Magnetresonanztomographie

Hypothesen 1 und 2

→ höherer fMRT-Lateralitätsindex bei Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ als bei Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ in der Region-of-Interest (ROI) sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene

→ höhere Voxelanzahl in den ROIs bei Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ als bei Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ und Aktivierungen mit höheren t-Werten in den sprachrelevanten Arealen auf individueller Ebene

Versuchspersonenebene

Bei der Betrachtung der Ergebnisse auf Versuchspersonenebene zeigt sich, in Bezug auf eine klarere Lateralisierungsfähigkeit, keine signifikante Überlegenheit einer Aufgabe. Mit beiden Aufgaben gelingt es gleichermaßen und nur mit wenigen Ausnahmen, eine stärkere Beteiligung der linken Hemisphäre bei der Bearbeitung der Sprachaufgaben zu dokumentieren (siehe Abschnitt 4.1.2.1.). Dieses Ergebnis findet sich auch bei der Betrachtung der Lateralitätsindizes unter verschiedenen ROI-Radien (10 mm, 20 mm und 30 mm) und unabhängig von der Berechnungsart des fMRT-LI (Fernández- oder Voxelcount-Ansatz) (siehe Abschnitt 4.1.2.2.).

Unter genauerer Betrachtung der Ergebnisse bei der Wortgenerierung zeigt sich, dass nach Berechnung des fMRT-LI nach Fernández vier Versuchspersonen einen negativen fMRT-LI-Wert (rechte Hemisphäre stärker während der Generierung aktiviert als die linke Hemisphäre) über alle drei ROI-Radien haben (siehe Abschnitt 4.1.2.2.1. sowie Tabelle 17). Nur bei einer Versuchsperson (Vp 19; siehe Tabelle 17) liegen diese Werte

allerdings in einem Bereich, der eine zuverlässige Aussage über die Dominanz der rechten Hemisphäre erlaubt.

Im Vergleich zur Wortgenerierungsaufgabe liegt bei der Reimgenerierungsaufgabe nur bei zwei Versuchspersonen durchgängig über alle drei ROI-Radien ein negativer fMRT-LI-Wert nach Fernández vor (siehe Abschnitt 4.1.2.2.1. sowie Tabelle 18). Wiederum allein bei Versuchsperson 19 liegen diese Werte in einem Bereich, der eine zuverlässige und robuste Aussage über eine Dominanz der rechten Hemisphäre zulässt (siehe Tabelle 18).

Bei der Wahl des geeignetsten ROI-Radius und Berechnung des fMRT-LI nach Fernández sprechen hauptsächlich zwei Punkte für den ROI-Radius 30 mm: Zum einen liegen die Korrelationen zwischen den fMRT-LI-Werten beider Untersuchungsbedingungen bei den ROI-Radien 20 mm und 30 mm deutlich höher als bei ROI-Radius 10 mm (siehe Abschnitt 4.1.2.2.1.) und zum anderen steigt zwischen den Aufgabenbedingungen die einfache Übereinstimmung in der Vorhersage der dominanten Hemisphäre mit zunehmendem ROI-Radienumfang an (siehe Abschnitt 4.1.2.2.1.).

Bei einer Berechnung des $fMRT-LI_{Voxelcount}$ bei der Wortgenerierungsaufgabe zeigt sich ebenso wie bei der fMRT-LI-Berechnung nach Fernández mit wenigen Ausnahmen eine deutliche Lateralisation zur linken Hemisphäre. Anzumerken ist hierbei, dass sich insbesondere die Werte bei ROI-Radius 10 mm von den Werten der ROI-Radien 20 mm und 30 mm unterscheiden und dies in dem Sinne, dass sich mit zunehmender Größe des ROI-Radius auch eine klarere und robustere Lateralität einstellt. Ähnlich wie bei der Berechnung nach Fernández nimmt auch bei einer Berechnung des fMRT-LI nach der Voxelcount-Methode die Anzahl der Versuchspersonen, bei denen aufgrund der negativen fMRT-LIs eine Dominanz der rechten Hemisphäre zu vermuten wäre, mit steigendem ROI-Radius ab (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Da es relativ schwierig ist, die ideale Signifikanzschwelle zu bestimmen, bei der eine zuverlässige Aussage über die Dominanz einer Hemisphäre getroffen werden kann, wurde die in Abschnitt 3.1.4.6.2. beschriebene Vorgehensweise (fMRT-LI-Berechnung bei definierter Anzahl an Voxels in beiden Hemisphären) gewählt, um Versuchspersonen auch mit unterschiedlichsten Aktivierungsniveaus sinnvoll miteinander vergleichen zu können. Bei Verwendung dieses Ansatzes sprechen die fMRT-LI-Werte bei der Wortgenerierungsaufgabe und über alle drei ROI-Radien hinweg gesehen bei vier Versuchspersonen für eine Dominanz der rechten Hemisphäre.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Reimgenerierungsaufgabe nach dem Voxelcount-Ansatz findet sich ein eher kontinuierlicher Anstieg der fMRT-LIs über die drei ROI-Radien (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Nach der oben beschriebenen Vorgehensweise (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) spricht der über alle drei Radien gefundene fMRT-LI bei fünf Versuchspersonen für eine Dominanz der rechten Hemisphäre. Ähnlich wie bei der Berechnung des fMRT-LI nach Fernández liegen die Korrelationen zwischen beiden Aufgabenbedingungen für die ROI-Radien 20 mm und 30 mm deutlich über dem Wert des ROI-Radius 10 mm (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Die einfache Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre spricht für eine Überlegenheit der beiden größeren ROI-Radien gegenüber dem ROI-Radius 10 mm (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.).

Interessant ist ein Vergleich beider Untersuchungsbedingungen hinsichtlich des t -Schwellenwertes, bei dem die erwünschte Voxelanzahl (500 Voxels bei Radius 10 mm sowie 1000 Voxels bei den Radien 20 mm und 30 mm) erreicht wird (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2 sowie 4.1.2.2.2.). Der hierbei gefundene signifikante Unterschied zwischen beiden Untersuchungsbedingungen verdeutlicht, dass es mit der Reimgenerierungsaufgabe in weitaus stärkerem Ausmaß gelingt, Aktivierungen in sprachrelevanten Arealen bzw. den gewählten ROIs auszulösen (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Wie die Ergebnisse zeigen, hat dies allerdings keinen direkten Einfluss auf die Stärke der Lateralisation und damit auch nicht auf die Genauigkeit der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre. Von entscheidendem Vorteil wäre bei diesem Aufgabentyp, dass selbst Versuchspersonen mit sehr niedrigen Aktivierungsschwellen zuverlässig klassifiziert werden könnten. Ergebnisse, die mit Hilfe des Wortgenerierungsparadigmas gewonnen würden und aufgrund zu niedriger t -Schwellenwerte als fragwürdig anzusehen wären, könnten durch eine Hinzunahme des Reimgenerierungsparadigmas validiert bzw. gestützt werden. Zusätzlich wären die Ergebnisse deutlich robuster und aussagekräftiger aufgrund der Fähigkeit dieses Aufgabentyps, stärkere Aktivierungen auf zerebraler Ebene zu provozieren.

Gruppenebene

Auf Gruppenebene sehen die Ergebnisse weniger eindeutig aus. Bei der Berechnung des fMRT-LI nach dem Fernández-Ansatz findet sich kein Unterschied zwischen beiden Aufgaben (siehe Abschnitt 4.1.2.4.1.); wird der fMRT-LI allerdings nach dem Voxelcount-Ansatz errechnet, unterscheiden sich beide Aufgaben bezüglich ihrer

Lateralisierungsfähigkeit, unabhängig vom gewählten ROI-Radius, signifikant (siehe Abschnitt 4.1.2.4.2.). Entgegen der ursprünglichen Hypothese liegen hierbei die fMRT-LI-Werte signifikant höher, wenn die Versuchspersonen die Wortgenerierungsaufgabe (vs. Reimgenerierungsaufgabe) bearbeiten. Es muss erwähnt werden, dass die fMRT-LI-Werte bei einer Berechnung mit dem Voxelcount-Ansatz sehr stark mit der Größe des gewählten ROI-Radius variieren und mit zunehmender Größe des Radius (10 mm < 20 mm < 30 mm) stärker lateralisieren. Als geeignetste Variante stellte sich die Berechnung des fMRT-LI_{Voxelcount} unter dem ROI-Radius 30 mm heraus. Hierbei variierten die Werte am geringfügigsten zwischen den verschiedenen Signifikanzschwellen (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) und lateralisierten gleichzeitig am stärksten (siehe Abschnitt 4.1.2.4.2.).

Hypothesen 3 und 4

→ Kontrast „Wortgenerierung minus Ruhe“ aktiviert zuverlässig sprachrelevante Areale (sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene)

→ Kontrast „Reimgenerierung minus Ruhe“ aktiviert zuverlässig sprachrelevante Areale (sowohl auf Gruppen- als auch auf Versuchspersonenebene)

Versuchspersonenebene

Auf der Versuchspersonenebene gelingt es bei nahezu jeder Versuchsperson, sowohl mit der Wort- als auch mit der Reimgenerierung, linkshemisphärische inferior-frontale Areale (BA 44/45 oder 47) zu aktivieren (siehe Tabellen 13-16). Dies bestätigt auch die Befunde zahlreicher vorheriger Studien (Adcock et al., 2003; Brazdil et al., 2005; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Frith et al., 1991; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Maldjian et al., 2002; Palmer et al., 2001; Phelps et al., 1997; Pujol et al., 1996; Schlösser et al., 1998; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1995). Eine Ausnahme bildet lediglich Versuchsperson Nr. 15, bei der sich weder bei Wort- noch bei Reimgenerierung eine linkshemisphärische sprachrelevante Aktivierung zeigt. Bei Versuchsperson Nr. 19 gelingt der Nachweis einer linkshemisphärischen Aktivierung des inferioren Frontalkortex nur mit der Reimgenerierung (siehe Abschnitt 4.1.2.1.2.). Hätte man allein das Ergebnis der Wortgenerierungsbedingung betrachtet, wäre man

mit hoher Wahrscheinlichkeit zu dem Schluss gelangt, dass die linkshemisphärische inferior-frontale Hirnregion bei dieser Versuchsperson bei Sprachprozessen eine eher untergeordnete, wenn nicht sogar keine Rolle spielen würde (siehe Tabelle 13 sowie Diskussion der Hypothesen 1 und 2).

Weitere Regionen, die bei beiden Aufgabenbedingungen gleichermaßen beteiligt waren, umfassen die Region der Insula, den präzentralen Kortex sowie den superioren temporalen Pol.

Allein der mittlere frontale Kortex (MFG) in beiden Hemisphären scheint bei der Reimgenerierung deutlich stärker aktiviert zu sein als bei der Wortgenerierung (siehe Tabellen 13-16). Dieser Befund einer starken Aktivierung des MFG bei phonologischen Sprachprozessen wird durch eine Reihe von Forschungsarbeiten zu diesem Themenbereich bestätigt (siehe Hypothese 6) (Baciu et al., 2001; Bahn et al., 1997; Burton et al., 2000; Crosson et al., 2003; Kuo et al., 2004; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004).

Bei der Betrachtung der rechtshemisphärischen Aktivierungen finden sich deutlich stärkere Aktivierungen, als dies aufgrund der Forschungsliteratur zu erwarten gewesen wäre (siehe Abschnitt 4.1.2.1.; s. u.). Beim Vergleich beider Aufgabenbedingungen zeigt sich unter der Reimgenerierungsbedingung sogar eine noch deutlich stärkere Beteiligung dieser rechtshemisphärischen inferior-frontalen Areale (siehe Abschnitt 4.1.2.1. sowie Tabellen 14 und 16). Dennoch muss beachtet werden, dass unter beiden Aufgabenbedingungen nur eine Aktivierung des superioren Frontalkortex stärker rechts- als linkshemisphärisch auftritt.

Gruppenebene

Bei Kontrast 1 „Wortgenerierung minus Ruhe“ finden sich auf Gruppenebene zwei hochsignifikante Aktivierungscluster im frontalen Kortex. Bei den aktivierten Regionen handelt es sich um das Gebiet der Insula sowie um den angrenzenden inferioren Frontalkortex, dies allerdings sowohl links- als auch rechtshemisphärisch (siehe Abbildung 41). Dieses Ergebnis ist insofern überraschend, als in der aktuellen wissenschaftlichen Forschung größtenteils von einer klareren Lateralisation zu Gunsten der linken Hemisphäre ausgegangen wird (Adcock et al., 2003; Brazdil et al., 2005; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Deppe et al., 2000; Frith et al., 1991; Fu et al., 2002; Gaillard et al., 2000; Lurito et al., 2000; Maldjian et al., 2002; Palmer et al., 2001; Phelps et al., 1997; Pujol et al., 1999; Pujol et al., 1996; Schlösser et al., 1998; van der

Kallen et al., 1998; Wood et al., 2004; Wörmann et al., 2003; Yetkin et al., 1995). Obwohl die Clustergröße (Anzahl aktivierter Voxels) für eine stärkere Beteiligung der linken Hemisphäre bei der Wortgenerierung spricht, bleibt fraglich, wie es dennoch zu einer derart starken rechtshemisphärischen Aktivierung kommen kann. Eine mögliche Erklärung wäre, dass zu viele eher rechtshemisphärisch sprachdominante oder bilaterale Versuchspersonen an der Untersuchung teilgenommen haben. Die Betrachtung der Einzelergebnisse (siehe Abschnitt 4.1.2.1 und 4.1.2.2.) oder der Daten der Probanden, die an beiden Untersuchungszeitpunkten (fTCD und fMRT) teilgenommen haben (siehe Abschnitt 4.3.3.), legen diesen Schluss allerdings nicht nahe. Zu eindeutig liegen die Lateralitätsindizes nahezu aller Versuchspersonen im positiven Bereich, d. h. sprechen für eine eher linkshemisphärische Sprachdominanz. Aufgrund der hohen Anzahl an Versuchspersonen und der Berechnung von Random Effects (siehe Abschnitt 2.2.5.2.5.) kann auch eine Verzerrung des Ergebnisses durch zu starke Aktivierungen einzelner Versuchspersonen ausgeschlossen werden (Adcock et al., 2003).

Eine alternative Erklärung wäre, dass Sprachprozesse (in diesem Fall die Wortgenerierung) nicht wie intuitiv angenommen und auch vielfach publiziert lediglich linkshemisphärische Areale aktivieren. Stattdessen könnte man aufgrund der vorliegenden Ergebnisse vermuten, dass rechtshemisphärische homologe Regionen bei der Bearbeitung sprachlicher Aufgaben in einem weitaus stärkeren Ausmaß als vielfach angenommen eine Rolle spielen (siehe auch Versuchspersonenebene). Bei genauerer und kritischer Betrachtung zahlreicher Publikationen fällt auf, dass zwar häufig in den Ergebnissen über erkennbare und teilweise auch recht deutliche Aktivierungen rechtshemisphärischer sprachassoziierter Areale berichtet wird, dies allerdings bei der Ergebnisdiskussion eher vernachlässigt wird. Vielfach wird auch nur auf die Überlegenheit einer (meist der linken) Hemisphäre eingegangen, und die zum Teil auch recht deutlichen Aktivierungen der anderen Hemisphäre (meist der rechten) bleiben dabei häufig unerwähnt (Deblaere et al., 2002). So entsteht schnell der Eindruck, Sprachprozesse würden grundsätzlich nur linkshemisphärisch stattfinden, obwohl die Ergebnisse diesen Rückschluss selten so bedingungslos zulassen.

In einer Studie von Fu und Kollegen, in der 11 gesunde rechtshändige männliche Versuchspersonen während einer fMRT-Messung die Wortgenerierungsaufgabe durchführten, fanden sich fast gleichhäufig Aktivierungen der linken wie der rechten

frontalen Sprachregionen (Fu et al., 2002). Kritisch anzumerken ist, dass weder über genaue t -Schwellenwerte der einzelnen Aktivierungscluster berichtet wurden, noch in der Diskussion auf die rechtshemisphärischen Aktivierungen in angemessener Weise eingegangen wurde. Auch Maldjian und Mitarbeiter untersuchten 8 gesunde Versuchspersonen mit dem gleichen Wortgenerierungsparadigma (Maldjian et al., 2002). Signifikant aktivierte frontale Regionen umfassten den linken superior-frontalen Kortex (BA 6) sowie den rechtshemisphärischen Bereich der Insula und des inferior-frontalen Kortex (BA 13 und 47). Die Datenerhebung wurde zudem zu einem weiteren Zeitpunkt wiederholt, so dass eine hohe Zuverlässigkeit der gefundenen Ergebnisse gewährleistet werden konnte (reproducibility values bei der Wortgenerierung von 0.99 bis 0.65; (Maldjian et al., 2002)). In ihrer Diskussion der Ergebnisse verweisen die Autoren darauf, dass bei der Wortgenerierung große und gleichzeitig stark verteilte Aktivierungscluster, dabei insbesondere auch Aktivierungen rechtshemisphärischer Areale, zu beobachten waren. Sie nehmen an, dass diese rechtshemisphärischen Aktivierungen auf kognitive Prozesse zurückzuführen seien, die bei Sprache im Allgemeinen eine Rolle spielen könnten. Dennoch verweisen Maldjian und Mitarbeiter darauf, dass der wahre Grund dieser Aktivierungen zu diesem Zeitpunkt noch ungeklärt sei („their true nature remains unknown at this time“) (Maldjian et al., 2002). Auch Deblaere und Kollegen untersuchten gesunde Versuchspersonen anhand der Wortgenerierung ($N = 9$) und fanden starke inferior-frontale Aktivierungen, *überwiegend* der linken Hemisphäre (Deblaere et al., 2002). Allerdings werden wiederum keine konkreten t -Schwellenwerte berichtet und in der Diskussion wird auch nicht auf die Aktivierungen der rechten Hemisphäre eingegangen. Exakte Koordinaten werden in der Studie ($N = 12$) von Schlösser und Kollegen genannt, die ebenfalls die Wortgenerierung zur Aktivierung sprachlicher Areale nutzten (Schlösser et al., 1998). In ihrer Studie bestätigt sich die dominantere Rolle der linkshemisphärischen inferior-frontalen Areale bei der Bearbeitung der Generierungsaufgabe. Schlösser und Kollegen verweisen dennoch auf die, zwar nur in der Gruppe der Frauen ($N = 6$), signifikant aktivierte rechtshemisphärische Region des orbito-frontalen Kortex, bieten dafür jedoch in der Diskussion keine Erklärung an. In einer Studie von Yetkin und Mitarbeitern wurden 9 gesunde Versuchspersonen während der Wortgenerierung gescannt (Yetkin et al., 1995). Die Ergebnisse legen eine stärkere Beteiligung linkshemisphärischer Hirnareale bei der Bearbeitung der Aufgabe nahe, da jedoch genaue Statistiken über t -Schwellenwerte fehlen, kann ein Vergleich nur anhand aktivierter Voxels vorgenommen werden. In der Diskussion wird

wiederum nicht auf die rechtshemisphärischen Aktivierungen eingegangen, obwohl sie relativ eindeutig zu beobachten sind (Yetkin et al., 1995). In der Arbeit von Cuenod und Mitarbeitern werden die aktivierten Regionen („signal increase“) pro Hemisphäre bei jeder Versuchsperson ausgezählt, ohne jedoch ein nachvollziehbares Kriterium (z. B. bestimmter t -Schwellenwert) für die Auswahl bereitzustellen (Cuenod et al., 1995). Insgesamt liegen bei der Wortgenerierung auch hier linkshemisphärisch eindeutig mehr aktivierte Regionen vor, dennoch zeigt sich bei zumindest vier der acht Versuchspersonen auch eine deutliche Aktivierung rechtshemisphärischer sprachassoziierter Areale. Hierauf wird in der anschließenden Diskussion nicht genauer eingegangen und stattdessen nur auf die deutliche Dominanz linkshemisphärischer Sprachgebiete verwiesen (Cuenod et al., 1995). Zu einem anderen und eher den Annahmen des vorliegenden Theorieteils entsprechenden Ergebnis kommt die Arbeitsgruppe um Adcock (Adcock et al., 2003). In ihrer Studie bearbeiteten 9 gesunde Kontrollprobanden eine lexikalische Wortgenerierungsaufgabe während einer fMRT-Messung. Die Ergebnisse ihrer Random Effects Analyse zeigen eine eindeutige Lateralisation zu Gunsten der linken Hemisphäre. Keine rechtshemisphärische inferior-frontale oder benachbarte Region wird bei einem relativ niedrigen z -Schwellenwert ($z > 2.3$; $p < .01$ korrigiert) in der Gruppenanalyse signifikant (Adcock et al., 2003). Fasst man diese sehr unterschiedlichen, teilweise sogar widersprechenden Befunde zusammen, sollte man vermuten, dass Sprachprozesse (insbesondere bei gesunden rechtshändigen männlichen Versuchspersonen) nicht, wie häufig dargestellt und auch intuitiv angenommen, ausschließlich linkshemisphärisch stattfinden. Vielmehr sollte ein kritischerer Blick auf vereinfachende Darstellungen insbesondere dieses Themenbereiches geworfen werden und die Ergebnisse bzw. Diskussion der Ergebnisse genauer hinterfragt werden.

Ein ähnliches Ergebnis wie unter der Wortgenerierungsbedingung liegt auch bei der Reimgenerierung (Kontrast 2) vor, mit dem Unterschied, dass ein zusätzliches Aktivierungscluster im supplementär-motorischen Kortex hinzukommt (siehe Abschnitt 4.1.2.3.1.). Im Vergleich zur Wortgenerierungsaufgabe liegen die t -Schwellenwerte der drei gefundenen Cluster bei der Reimgenerierung auf einem weitaus höheren Niveau und deuten damit wiederum auf eine stärkere zerebrale Aktivierungsfähigkeit dieses Aufgabentyps hin (s. o.). Im Kontrast zur Wortgenerierung liegt bei der Reimgenerierung die Anzahl an rechtshemisphärisch aktivierten Voxels aber sogar noch über der Voxelanzahl in den linkshemisphärischen sprachrelevanten Regionen. Auch

dieses Ergebnis verwundert zunächst, bekräftigt allerdings den Befund der Wortgenerierungsaufgabe, dass rechtshemisphärische Kortexareale stärker als vermutet an den untersuchten Sprachprozessen beteiligt sind (s. o.).

Hypothese 5

→ Deutlichere Aktivierung sprachrelevanter linkshemisphärischer Areale bei Kontrast „Reim- minus Wortgenerierung“ als bei Kontrast „Wort- minus Reimgenerierung“

Dieser Annahme lag die Vermutung zu Grunde, dass mit der Reimgenerierung im Gegensatz zur Wortgenerierung auf Gruppenebene eine deutlichere Aktivierung sprachlicher Areale erreicht werden könnte und sich dies bei einer konkreten Kontrastierung zeigen würde. Da beide Aufgaben, wie berichtet, sehr ähnliche Regionen und diese mit fast gleicher Stärke aktivierten (siehe Abschnitt 4.1.2.1), konnte selbst bei sehr niedriger Signifikanzschwelle und bei keinem Kontrast (weder Kontrast 3 noch 4) eine relevante linkshemisphärische Sprachregion - die bei einer Aufgabenbedingung deutlicher als bei der anderen aktiviert wäre - ausgemacht werden. Wie schon nach Betrachtung der Aktivierungen bei Kontrast 2 (starke rechtshemisphärische Aktivierungen im inferior-frontalen Kortex; s. o.) zu vermuten gewesen wäre, finden sich allerdings bei einer Kontrastierung von Reim- minus Wortgenerierung (Kontrast 4) zwei signifikant aktivierte rechtshemisphärische Cluster (siehe Abschnitt 4.1.2.3.2.).

Hypothese 6

→ stärkere Aktivierung sprachrelevanter Areale bei Kontrast „Reim- minus Wortaufgaben“ als bei Kontrast „Wort- minus Reimaufgaben“

Bei Kontrast 8 „Reim- minus Wortaufgaben“ finden sich in der Tat signifikante Aktivierungen in den mit Sprachprozessen assoziierten linkshemisphärischen Arealen des präzentralen Kortex sowie des MFG (siehe Abschnitt 4.1.2.3.4.). Eine speziell im Zusammenhang mit phonologischen Aufgaben gefundene Aktivierung des linkshemisphärischen MFG konnte in der aktuellen Forschungsliteratur wiederholt gezeigt

werden (siehe Hypothese, 3 und 4) (Baciu et al., 2001; Bahn et al., 1997; Burton et al., 2000; Crosson et al., 2003; Klein et al., 1995; Kuo et al., 2004; Poldrack et al., 1999; Seghier et al., 2004). Die Arbeitsgruppen um Bahn und Crosson und Kollegen fanden im Zusammenhang mit einer Art Reimgenerierung (Hören oder Lesen eines regulären Wortes → Antwort mit einem regulären Reimwort; z. B. Rat → Cat; siehe Abschnitt 2.6.1.5.3) Aktivierungen in eher posterior gelegenen Arealen des linkshemisphärischen MFG (BA 46/6) (Bahn et al., 1997; Crosson et al., 2003). Einschränkend muss erwähnt werden, dass Klein und Mitarbeiter mit der gleichen Aufgabenbedingung eher Aktivierungen im Bereich des linkshemisphärischen IFG/SFG postulierten (Klein et al., 1995). Pujol sowie Fiez und Kollegen vermuten im posterior gelegenen IFG/MFG eine Region, die speziell bei der Generierung von Tonsequenzen („phonological processes“) beteiligt sein könnte (siehe Abschnitt 2.6.1.5.3.) (Fiez, 1997; Pujol et al., 1996). Die Arbeitsgruppe um Burton fand dagegen eine noch stärkere Aktivierung des inferior-frontalen Kortex im Zusammenhang mit phonologischen Sprachprozessen (Burton et al., 2000). Dies kann aber möglicherweise durch die Art des gewählten Kontrastes erklärt werden. In der vorliegenden Studie wurden die lexikalischen Aufgabenbedingungen „Wortentscheidung und -generierung“ von den phonologischen Bedingungen „Reimentscheidung und -generierung“ subtrahiert. Da unter allen Bedingungen (jede für sich betrachtet) insbesondere der inferior-frontale Kortex (BA 44/45 und 47) aktiviert war, kann man vermuten, dass sich diese Aktivierungen größtenteils gegenseitig aufheben und nur solche Aktivierungscluster „übrig“ bleiben, die speziell mit phonologischer Verarbeitung assoziiert sind.

Bei Kontrast 7 „Wort- minus Reimaufgaben“ findet sich lediglich ein signifikantes Aktivierungscluster im linkshemisphärischen (bzw. fast bilateralen) Gyrus Rectus. Laut einer Studie von Szatkowska und Kollegen ist diese Region insbesondere an der Wortgenerierung beteiligt (Szatkowska, Grabowska, & Szymanska, 2000). Szatkowska und Kollegen untersuchten u. a. Gyrus Rectus lobektomierte/resektierte Patienten und konnten zeigen, dass es dieser Untersuchungsgruppe signifikant schlechter gelang, Wörter auf Buchstaben zu generieren als semantisch verwandte Wörter zu einem Oberbegriff zu finden (Wort- vs. semantisches Generieren). Der Befund lässt sich gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie in Einklang bringen, da hier konkrete lexikalische Wortaufgaben mit phonologischen Reimaufgaben verglichen wurden. Demnach scheint der Gyrus Rectus speziell an lexikalischer Verarbeitung beteiligt zu

sein, unabhängig davon, ob Wörter auf Buchstaben generiert werden müssen oder ob eine Entscheidung über die Existenz eines Wortes getroffen werden muss.

Hypothese 7

→ stärkere Aktivierung sprachrelevanter Areale bei Kontrast „Generierungs- minus Entscheidungsaufgaben“ als bei Kontrast „Entscheidungs- minus Generierungsaufgaben“

Diese Hypothese kann mit relativ großer Sicherheit bestätigt werden. Der Kontrast 9 „Generierungs- minus Entscheidungsaufgaben“ bestätigt zwar wiederum, dass sowohl links- als auch rechtshemisphärische sprachassoziierte Hirnareale bei der Generierung (Wörter und Reime) beteiligt sind, dies allerdings in signifikant stärkerem Ausmaß als unter den Entscheidungsbedingungen (Wörter und Reime). Dieser Befund bestätigt auch die Annahme von Calvert und Mitarbeitern, nach dem insbesondere Generierungsaufgaben mit einem stärkeren „cognitive load“ einhergehen und damit als besonders gut geeignet erscheinen, sprachrelevante Regionen zu aktivieren (Calvert et al., 2000). Die Aktivierung im Gyrus Cinguli scheint dagegen eher auf Arbeitsgedächtnisprozesse, eventuell ausgelöst durch die Notwendigkeit, sich die Triggerstimuli über den Zeitraum des Generierens zu merken, zurückzuführen zu sein (Baxter et al., 2003; Holland et al., 2001; McGraw et al., 2001; Palmer et al., 2001; Price et al., 1996; Szaflarski et al., 2002; van der Kallen et al., 1998; Yetkin et al., 1995; Yetkin et al., 1998).

Bei der Kontrastierung von Entscheidung vs. Generierung (Kontrast 10) ergeben sich fünf kleinere und eher rechtshemisphärische signifikante Aktivierungscluster. Es kann nur spekuliert werden, dass diese Aktivierungen möglicherweise mit der repetitiven Darbietung von Entscheidungsstimuli und der dadurch jeweils erneut erfolgten Fokussierung und Konzentrationsausrichtung einhergehen könnten.

Hypothese 8

→ Kontrast „Interaktion“ (zwischen phonologischer Aufgabe und Generierung) führt zu selektiver Aktivierung eines sprachrelevanten, linkshemisphärischen Areals auf Gruppenebene

Das Ergebnis dieses speziellen Kontrasts (siehe Abschnitt 4.1.2.3.6.) zu bewerten, fällt nicht einfach. Zwar findet sich ein signifikantes linkshemisphärisches Aktivierungscluster (superior-frontaler Kortex), welches trotz unkorrigiertem p -Schwellenwert ($p = .001$; siehe Abschnitt 4.1.2.3.6.) eine beachtliche Größe aufweist. Dennoch bleibt die Frage, wieso speziell diese frontale Hirnregion verantwortlich für das Zusammenspiel von Generierung und phonologischer Aufgabe sein soll? In der aktuellen Forschungsliteratur liegen bislang keine Studien zu phonologischen Generierungsaufgaben vor, die mit dem Paradigma der vorliegenden Studie vergleichbar wären. Betrachtet man Aktivierungen des linkshemisphärischen superior-frontalen Kortex, die bei anderen Studien gefunden wurden und ebenfalls mit sprachlichen Prozessen im Zusammenhang stehen, finden sich Hinweise, dass diese Region u. a. bei Generierungsprozessen eine Rolle spielen kann (Vartanian & Goel, 2005). Häufig wird in der Literatur auch über eine Beteiligung dieses Areals bei Entscheidungen in ungewissen Situationen („uncertainty situations“) sowie beim Unterdrücken von Antworten („response inhibition“) spekuliert (Booth et al., 2003; Kemmotsu, Villalobos, Gaffrey, Courchesne, & Muller, 2005; Volz, Schubotz, & von Cramon, 2004). Möglicherweise kommt es speziell beim phonologischen Generierungsprozess zu einer fortlaufenden mentalen Abfrage über die Sinnhaftigkeit der gefundenen (Reim-)Wörter, welche anschließend jedoch nicht selten verworfen bzw. inhibiert werden müssen.

Ergänzende fMRT-Ergebnisdiskussion

→ Kontrast „Wortentscheidung minus Ruhe“ und Kontrast „Reimentscheidung minus Ruhe“

Zu den Kontrasten 5 und 6 wurden keine separaten Hypothesen formuliert, da dies nicht zur eigentlichen Fragestellung der vorliegenden Arbeit gehörte. Beide Aufgaben-

bedingungen (Wort- und Reimentscheidung) waren lediglich konstruiert worden, um einen möglichen Interaktionseffekt berechnen zu können (siehe Abschnitt 4.1.2.3.3.). Interessant ist es dennoch, beide Entscheidungsaufgaben einzeln zu betrachten und die Ergebnisse mit den Ergebnissen der Generierungsaufgaben zu vergleichen. Bei Kontrast 5 („Wortentscheidung minus Ruhe“) ergeben sich drei signifikante Aktivierungscluster, allerdings mit einem deutlichen Übergewicht der rechtshemisphärischen inferior-frontalen Areale (siehe Abschnitt 4.1.2.3.3.). Vergleichsweise robustere und eher bilaterale Aktivierungen zeigt Kontrast 6 („Reimentscheidung minus Ruhe“). Auch bei diesen Kontrastierungen fällt es schwer, die übermäßige und unerwartet starke Beteiligung der rechten Hemisphäre zu erklären. In der aktuellen Forschungsliteratur wurde wiederholt darauf hingewiesen, dass sich Entscheidungsaufgaben im Vergleich zu Generierungsaufgaben weniger gut eignen würden, um sprachassoziierte Aktivierungen zu evozieren (Benson et al., 1999; Cuenod et al., 1995; Deblaere et al., 2002; Lehericy et al., 2000). Dennoch würde man auch bei diesem Aufgabentyp eine (klarere) Lateralisation zu Gunsten der linken Hemisphäre erwarten (Deblaere et al., 2002; Specht, Holtel et al., 2003). Zu einem weniger eindeutigen, aber mit der vorliegenden Untersuchung vergleichbaren Ergebnis, kommt die Studie von Kiehl und Kollegen (Kiehl et al., 1999). Mit einer lexikalischen Entscheidungsaufgabe („Wortentscheidung“) untersuchten sie die Verarbeitung konkreter vs. abstrakter Stimuli und fanden, ähnlich wie in der vorliegenden Studie (siehe Abschnitt 4.1.2.3.3.), eine größtenteils bilaterale Aktivierung sprachrelevanter Areale (siehe Abbildung 52).

An dieser Stelle sollte noch erwähnt werden, dass sich entgegen der Erwartung ein signifikanter Unterschied zwischen Wort- und Reimentscheidung in der Leistung zeigte (siehe Abschnitt 4.1.1.).

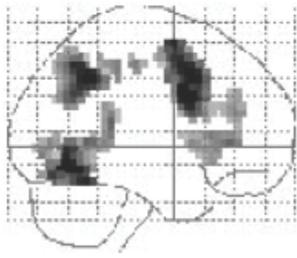
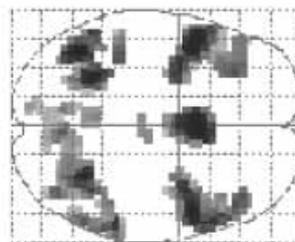
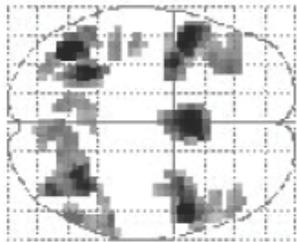
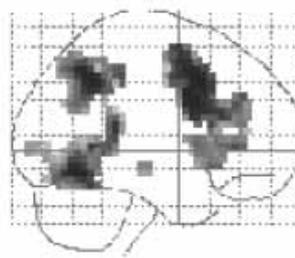
Kontrast „konkrete Wörter vs. baseline“**Kontrast „abstrakte Wörter vs. baseline“**

Abbildung 52: Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung; Kontraste „konkrete Wörter vs. baseline“ und „abstrakte Wörter vs. baseline“ (entnommen aus: Kiehl et al., 1999)

Obwohl die Schwierigkeiten der einzelnen Items in einer Voruntersuchung getestet wurden, muss man annehmen, dass den Probanden die Bearbeitung der Reimentscheidungsaufgabe schwerer fiel, als dies bei der Wortentscheidungsaufgabe der Fall war.

Hypothese 9

→ beide Berechnungsarten des Lateralitätsindex (Fernández- vs. Voxelcount-Ansatz) sollten sich nicht hinsichtlich der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre unterscheiden

Der Vergleich zwischen dem Fernández- und Voxelcount-Ansatz zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung bezüglich der Vorhersage der Hemisphärendominanz. Die Korrelationen zwischen den beiden Berechnungsarten liegen im hochsignifikanten Bereich, bei der Reimgenerierung sogar noch höher als bei der Wortgenerierung (siehe Abschnitt 4.1.2.2.3. sowie Abbildung 40). Bei beiden Aufgabenbedingungen findet sich die höchste Korrelation zwischen den Berechnungsarten bei einem ROI-Radius von 30

mm. Dies bestätigt wiederum, dass es sich bei dieser ROI-Größe wohl um den geeignetsten Radius handelt, um eine zuverlässige und gegen Aktivierungsschwankungen robuste Bestimmung der sprachdominanten Hemisphäre vornehmen zu können. Betrachtet man die einfache Übereinstimmung beider Verfahren (Voxelcount- und Fernández-Ansatz) in der Vorhersage der sprachlichen Hemisphärendominanz (bei einem über alle drei ROI-Radien gemittelten fMRT-LI; siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.), zeigt sich, dass dies mit der Reimgenerierung (94%) im Vergleich zur Wortgenerierung (84%) besser gelingt.

Diskussion der fMRT-Methode

Wahl des t -Schwellenwertes bei fMRT-Aktivierungsberechnungen

Bei der Ergebnisdarstellung, sowohl auf Versuchspersonen- als auch auf Gruppenebene, muss kritisch bemerkt werden, dass die Wahl des t -Schwellenwertes, ab dem bestimmte Voxels als aktiviert gelten, im gewissen Sinne als willkürlich zu bezeichnen ist (siehe Abschnitt 2.2.5.3). Dabei können gewisse Clustergrößen verschwinden bzw. als signifikant erscheinen, je nachdem wie weit der t -Schwellenwert herab- bzw. heraufgesetzt wird. Diese relative Willkürlichkeit sollte in der vorliegenden Arbeit durch eine transparente Darstellung und Dokumentation der Wahl der t -Schwellenwerte (siehe Abschnitt 4.1.2. und Anhang XVIII-XIX) ausgeglichen werden.

Dazu wurde zunächst für jede Versuchsperson sukzessiv der t -Schwellenwert gesucht, bei dem kein aktiviertes Cluster ≥ 1000 Voxels war, dennoch aber ein aussagekräftiger Aktivierungswert vorlag. Bei den Versuchspersonen Vp 31, 35, 38 bei der Wortgenerierung und Vp 35 bei der Reimgenerierung war das Aktivierungsniveau allerdings derart hoch, dass selbst bei striktester Wahl des t -Schwellenwertes ($t > 5.82$ FWE) noch mehr als 1000 Voxels in einem oder mehreren Clustern aktiviert waren.

Zwischen den Aufgabenbedingungen divergierten die gewählten t -Schwellenwerte nur bei zwei Versuchspersonen (Vpn 11 und 34; siehe Tabellen 13-16). Somit wurde, unabhängig von der Schwierigkeit der Intersubjektvergleiche, zumindest eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Aufgabenbedingungen gewährleistet.

Wahl des t -Schwellenwertes bei fMRT-Lateralisationsberechnungen

Bei der Berechnung des fMRT-Lateralitätsindex nach dem Voxelcount-Ansatz hat die Wahl des t -Schwellenwertes einen ähnlich starken Einfluss auf das Ergebnis (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Um die Ergebnisdarstellung hierbei so transparent wie möglich zu gestalten, ist es daher wichtig die fMRT-LI_{Voxelcount}-Werte jeder Versuchsperson für unterschiedliche t -Schwellenwerte anzugeben (siehe Abschnitt 4.1.2.2.2.). Gleichzeitig wurde bei jeder Versuchsperson der fMRT-LI_{Voxelcount} herausgestellt, bei dem 500 (ROI-Radius 10 mm) bzw. 1000 Voxels (ROI-Radien 20 mm und 30 mm) aktiviert waren (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) (Klöppel & Büchel, 2005; Specht, Willmes et al., 2003). Um ein möglichst differenziertes Bild über den Verlauf der Lateralisation für verschiedene t -Schwellenwerte zu bekommen, wurde für neun kontinuierlich ansteigende t -Schwellenwerte der fMRT-LI_{Voxelcount} berechnet und im Ergebnisteil in Tabellenform dargestellt (siehe Tabellen 19-20).

Bei der Berechnung des fMRT-LI_{Fernández} werden dagegen die Aktivierungspeaks in den ROIs beider Hemisphären miteinander verglichen. Die Wahl eines t -Schwellenwertes spielt hierbei keine Rolle (siehe Abschnitt 2.2.5.3.3.).

Größe des ROI-Radius

Bei beiden fMRT-LI-Berechnungsarten (Voxelcount- und Fernández-Ansatz) kann die Wahl des ROI-Radius die Größe bzw. die Richtung des Lateralitätsindex beeinflussen. Wird der ROI-Radius zu groß gewählt, besteht die Gefahr, dass Aktivierungen, die außerhalb der interessierenden Areale liegen (z. B. motorischer Kortex), relevante Aktivierungen überlagern. Dies könnte dazu führen, dass die eigentlichen Ergebnisse unkenntlich gemacht oder als übertrieben dargestellt werden (Jansen et al., submitted). Im entgegengesetzten Fall - der ROI-Radius wird zu klein gewählt - besteht die Gefahr, dass relevante Aktivierungen nicht erfasst werden. Aus diesen Gründen wurde in der vorliegenden Arbeit jeweils ein fMRT-LI für die ROI-Radien 10 mm, 20 mm und 30 mm berechnet (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.).

Erstellung der Region-of-Interest (ROI)

Bei der Erstellung der Region-of-Interest (ROI) kann auch auf verschiedene Weisen vorgegangen werden (siehe Abschnitt 2.2.5.3.2. sowie 3.1.4.6.1.). Die für die vor-

liegende Studie gewählte Variante integrierte dabei funktionelles und anatomisches Wissen, um den „*Center of Sphere*“ für beide Aufgabenbedingungen zu bestimmen (siehe Abschnitt 3.1.4.6.1.). Auch hierbei sollte auf die verschiedenen möglichen Auswirkungen anderer Varianten hingewiesen werden: Der erste Schritt bei der Suche des „*Center of Sphere*“ kann als relativ gut nachvollziehbar und durchführungsobjektiv betrachtet werden (siehe Abschnitt 3.1.4.6.1.). Der zweite Schritt eröffnet mehr Möglichkeiten, Einfluss zu nehmen: Es wurde zunächst der t -Schwellenwert ($t = 3.11$) gewählt, bei dem bei den meisten Versuchspersonen eine signifikante Peak-Aktivierung im inferior-frontalen Kortex – laut *automated anatomic labeling/aal-atlas* (siehe Abschnitt 3.1.4.6.2.) – vorlag. Anschließend wurden die Koordinaten dieser Peak-Aktivierung (und für diesen t -Schwellenwert) bei allen Versuchspersonen gemittelt und als „*Center of Sphere*“ verwendet (siehe Abschnitt 3.1.4.6.1.). Um in der rechten Hemisphäre mit einer identischen ROI arbeiten zu können, wurde der „*Center of Sphere*“ an der x -Koordinate ($x = 0$) gespiegelt.

Bei diesem Vorgehen könnte argumentiert bzw. kritisiert werden, dass der gewählte t -Schwellenwert (s. o.) bei einigen Versuchspersonen nicht die ideale Lösung wäre. Es wäre gut vorstellbar, dass einige Probanden, aufgrund unterschiedlicher Aktivierungsniveaus, unter dem ausgewählten t -Schwellenwert keinerlei relevante oder, sogar im Gegenteil, deutlich überhöhte Aktivierungen aufzuweisen hätten. Folglich könnte die Objektivität bei der Ermittlung des „*Center of Sphere*“ beeinträchtigt werden. Der „*Center of Sphere*“ könnte auch über ein alternatives zweistufiges Verfahren gewählt werden: Aus bestehendem anatomischen Wissen abgeleitet, könnte der Mittelpunkt der inferior-frontalen Kortexregion (aus einem anatomischen Template wie z. B. dem MNI *EPI-Template*; s. o.) bestimmt werden und anschließend bei jeder Versuchsperson und unter verschiedenen t -Schwellenwerten über den SPM-Befehl „*goto nearest local maxima*“ (siehe Abschnitt 3.1.4.6.1.) der nächstgelegene Aktivierungs-Peak gesucht werden. Dieses Vorgehen wäre zwar strukturierter und leichter nachvollziehbar, würde dafür aber interindividuelle anatomische Unterschiede nicht berücksichtigen.

Möglich wäre auch ein Vorgehen, bei dem das Wissen bisher publizierter Studien zu diesem Themenbereich genutzt würde. Danach könnte man beispielsweise die Koordinaten der Peak-Aktivierungen aller publizierten Bildgebungsstudien (z. B. zu lexikalischer Generierung; siehe Abschnitt 2.6.1.5.1.) mitteln und die gefundenen Koordinatenwerte als „*Center of Sphere*“ für die vorliegende Studie verwenden. Nachteilig wäre bei einem solchen Verfahren, dass selbst in den relevanten Publikationen

größtenteils zu unterschiedliche Aufgabentypen (Wortgenerierung vs. Wortstammergänzung) mit teilweise stark variierenden Untersuchungsparametern (leichte vs. schwere Buchstaben, unterschiedliche Design, unterschiedliche Kontrastbedingungen etc.) verwendet wurden (Fu et al., 2002; Palmer et al., 2001). Testweise wurde für die vorliegende Arbeit der Versuch unternommen, bisher veröffentlichte Studien zu diesem Themenbereich in die Gruppen „Lexikalische Generierung“, „Lexikalische Entscheidung“ sowie „Phonologische Entscheidung“ einzuteilen (Befunde wurden im Ergebnisteil nicht dokumentiert). Die Ergebnisse bezüglich eines aus der Literatur abgeleiteten „Center of Sphere“ unterscheiden sich danach in einem Bereich von 10-15 mm von den in der vorliegenden Studie gefundenen Werten. Dies deutet zwar auf eine abweichende Lokalisation des „Center of Sphere“ hin, sollte aber aufgrund der teilweise stark variierenden Koordinatenangaben in der Literatur (hohe *SD* pro Koordinate) nicht überschätzt werden.

Diskussion auffälliger Ventrikelaktivierungen bei der fMRT-Studie

Bei der Betrachtung der funktionellen MRT-Daten finden sich in der Gruppenanalyse bei jeder Aufgabenbedingung auffällige Ventrikelaktivierungen (siehe beispielsweise Abbildung 41). Auf Versuchspersonenebene erscheinen diese Aktivierungen dagegen nicht. Eine mögliche Erklärung für diesen unerwarteten Befund könnte die Anfälligkeit der Grenzbereiche - zwischen Gehirn (graue und weiße Substanz) und Liquor (Flüssigkeit in den Ventrikeln) - für „Aktivierungen“ sein. Da die BOLD-Effekte im Allgemeinen sehr gering sind (Signalveränderung um ca. 2-5%; siehe Abschnitt 2.2.4.), haben kleinere Kopfbewegungen schon oft einen größeren Einfluss. Insbesondere an den „Kanten“ (Liquor/graue und weiße Substanz) ist der Kontrastunterschied generell sehr scharf (bei kleinen Bewegungen bis zu 7-8% Signalveränderung). Im Gehirn (graue und weiße Substanz) haben vergleichbare Bewegungen dagegen nur eine Signalveränderung von 1-2% zur Folge und können durch Bewegungskorrekturen teilweise behoben werden (siehe Abschnitte 2.2.5.2.4. und 3.1.4.).

Diskussion der Stimuluskonstruktion für die fMRT-Studie

Die Stimuli der Wort- und Reimgenerierung für die fMRT-Untersuchung waren der Studie von Krach und Hartje (2006) entnommen. Dennoch mussten, um das vorliegende Untersuchungsparadigma dem faktoriellen Design von Friston und

Mitarbeitern möglichst anzugleichen, einige Variationen der Stimuli in Kauf genommen werden. Um den visuellen Input zwischen den Aufgabenbedingungen konstant zu halten, konnte bei der Wortgenerierungsbedingung nicht allein ein Buchstabe präsentiert werden (wie in der Studie von Krach und Hartje), sondern dieser musste in einem vierlettrigen Wort/Pseudowort als Anfangsbuchstabe implementiert sein. Obwohl sich dadurch Wort- und Reimtrigger in Bezug auf die visuelle Analyse (vierlettrig sowie erster Buchstabe rot markiert; siehe Abschnitt 3.1.3.3. sowie Abbildung 30) nicht mehr voneinander unterschieden, war dennoch der mentale lexikalische/phonologische Abruf insofern unterschiedlich, dass bei der Wortgenerierung im Gegensatz zur Reimgenerierung in 50% der Fälle korrekte deutsche Wörter zu lesen waren (siehe Abschnitt 3.1.3.2.3.). Dies sollte die Vergleichbarkeit mit der lexikalischen Wortentscheidungsaufgabe gewährleisten, bei der jeweils zwischen 50% Wort- und Pseudowortstimuli unterschieden werden sollte. Da bei der phonologischen Reimentscheidungsaufgabe nur Pseudowortstimuli präsentiert wurden, gab es im Endeffekt zwei Aufgabenbedingungen, bei denen sowohl Wort- als auch Pseudowortstimuli sowie zwei Aufgabenbedingungen, bei denen ausschließlich Pseudowortstimuli gelesen werden sollten. Zwischen den Generierungs- und Entscheidungsbedingungen konnte der visuelle Input bzw. die visuelle Analyse ebenso nur bedingt konstant gehalten werden. Vom Aufbau her waren die präsentierten Wort- und Pseudowortstimuli identisch, allerdings variierte die Anzahl der präsentierten Stimuli zwischen den Aufgabenbedingungen beträchtlich. Wurde bei den Generierungsaufgaben (Wort und Reim) nur jeweils ein Stimulus pro Durchgang präsentiert, lag die Anzahl präsentierter Stimuli pro Durchgang bei der Wortentscheidung schon bei fünf und bei der Reimentscheidung sogar bei zehn (fünf Entscheidungen zwischen jeweils zwei gleichzeitig präsentierten Stimuli; siehe Abschnitt 3.1.3.2.2. sowie Abbildung 30). Neben den Abweichungen im visuellen Input sollte zudem der verschieden starke mentale sprachliche Output zwischen den Aufgabenbedingungen kritisch betrachtet werden. Da sich bei beiden Entscheidungsbedingungen ein maximaler sprachlicher und damit auch motorischer „Output“ von fünf mentalen Entscheidungen bzw. Tastendrücken pro Durchgang ergab (was im Durchschnitt selbstverständlich nicht zu erwarten gewesen wäre), konnte man aufgrund der Ergebnisse der Studie von Krach und Hartje nicht davon ausgehen, dass sich diese Anzahl bei der Generierung (Wort und Reim) ebenfalls abzeichnen würde.

Nun könnte spekuliert werden, dass sich diese Unterschiede im visuellen Input sowie im sprachlichen/motorischen Output insbesondere in Regionen (motorischer Kortex, visueller Kortex etc.) widerspiegeln würden, die als relativ unabhängig zu sprachrelevanten Arealen zu sehen sind. Dennoch bleibt die Frage offen, in wieweit derartige Konstruktionsunterschiede der verschiedenen Aufgabenbedingungen auch wahre und relevante Effekte verwischen oder sogar verschwinden lassen könnten.

5.2. Diskussion der Hypothesen zur funktionellen transkranialen Dopplersonographie

Hypothese 1

→ höherer fTCD-Lateralitätsindex bei der Reim- als bei der Wortgenerierung

Im Unterschied zur Arbeit von Krach und Hartje findet sich in der vorliegenden Studie kein signifikanter Unterschied im fTCD-Lateralitätsindex im entscheidenden Generierungsintervall (siehe Abschnitt 4.2.2.3. sowie Tabelle 48). Obwohl der Mittelwert im fTCD-LI bei der Reimgenerierungsaufgabe im Generierungsintervall über dem der Wortgenerierungsaufgabe liegt, reicht die Stichprobengröße ($N = 27$) dennoch nicht aus, um von einem signifikanten Unterschied sprechen zu können. Es kann nur spekuliert werden, dass bei der erneuten Datenerhebung (acht zusätzliche Versuchspersonen zur vorangegangenen Studie) einzelne Versuchspersonen mit „Ausreißerwerten“ das Ergebnis verwischt haben, was aufgrund der relativ geringen Stichprobengröße nicht verwunderlich wäre.

Betrachtet man die Veränderung der Blutflusswerte für jede Hemisphäre separat, zeigt sich eine deutlichere Überlegenheit im Generierungsintervall zugunsten der Reimgenerierungsaufgabe, insbesondere wenn man die Blutflusswerte der linken Hemisphäre betrachtet (siehe Abschnitt 4.2.2.1.). Der Anstieg der CBFV vom Cue- zum Generierungsintervall wird für beide Aufgabenbedingungen, wie zu erwarten, nur für die linke Hemisphäre signifikant (siehe Tabelle 46 sowie Abschnitt 4.2.2.1.).

Hypothese 2

→ höherer fTCD-Aktivierungsindex bei der Reim- als bei der Wortgenerierung

Beim fTCD-Aktivierungsindex zeigt sich ein ähnliches Bild. Der Anstieg des fTCD-AI vom Cue- zum Generierungsintervall wird nur für die Reimgenerierungsaufgabe signifikant (s. 4.2.2.2. sowie Tabelle 47). Im Generierungsintervall zeigt sich trotz eines beachtlichen Mittelwertsunterschiedes zwischen den beiden Aufgabenbedingungen in der Aktivierung aber nur ein Trend zur statistischen Signifikanz. Dennoch bestätigen auch die Ergebnisse der fTCD, dass mit der Reimgenerierung im Gegensatz zur Wortgenerierung eine im Allgemeinen stärkere Aktivierbarkeit einhergeht. In diesem Zusammenhang ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die gemessene Leistung (Anzahl generierter Wörter/Reime) bei der Wortgenerierung deutlich höher ausfällt als bei der Reimgenerierung (siehe Abschnitt 4.2.1.), die Aktivierung sprachassoziierter Areale dennoch aber besser mithilfe der Reimgenerierung gelingt (s. o.).

5.3. Diskussion der Hypothesen zum Vergleich der fTCD- und fMRT-Daten

Hypothese 1

→ hohe Übereinstimmung zwischen fTCD-LI und fMRT-LI in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre

Die einfache Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen beiden methodischen Ansätzen liegt für beide fMRT-LI-Berechnungsarten in einem zufrieden stellenden Bereich (siehe Abschnitt 4.3.3.2.). Die höchste Übereinstimmung (14 von 16 Vpn) zwischen beiden Verfahren ergibt sich bei der Berechnung des fMRT-LI_{Fernández} für die Wortgenerierungsaufgabe (siehe Abschnitt 4.3.3.2. sowie Tabelle 27). Die nach der Reimgenerierung berechneten Lateralisationswerte sind allerdings konstanter, d. h. unabhängig von der Art der Berechnung (Fernández- oder

Voxelcount-Ansatz) werden die Versuchspersonen 13, 16 und 36 übereinstimmend als links- oder rechtshemisphärisch dominant klassifiziert (während diesen drei Versuchspersonen aufgrund der fTCD-LI-Werte eine Dominanz der jeweils anderen Hemisphäre vorhergesagt worden wäre; siehe Tabelle 27).

Nach der Berechnung des fMRT-LI_{Fernández} für die Wortgenerierung liegt die Übereinstimmung zwischen beiden methodischen Ansätzen (fMRT und fTCD) zwar am höchsten, dennoch muss beachtet werden, dass dieses Ergebnis nach dem Voxelcount-Ansatz nur für Versuchsperson 18 bestätigt werden kann (siehe Abschnitt 4.3.3.2. sowie Tabelle 27). Für die Versuchspersonen 10, 16 und 36 treffen die beiden fMRT-LI-Berechnungsverfahren (Fernández- und Voxelcount-Ansatz), bei Betrachtung der Aktivierung bei der Wortgenerierung, unterschiedliche Vorhersagen bezüglich der Sprachlateralität.

Hypothese 2

→ Die Leistung bei Wort- und Reimgenerierung unterscheidet sich nicht signifikant zwischen den Untersuchungsmethoden

Um beide methodische Ansätze (fTCD und fMRT) sinnvoll miteinander vergleichen zu können, war eine Grundvoraussetzung der Studie, dass keine Leistungsunterschiede bei der Bearbeitung der Aufgabenbedingungen zwischen den Erhebungsmethoden vorlagen. Dies konnte über einen Vergleich der Leistungsparameter sichergestellt werden, obwohl während der fMRT-Untersuchung nur die Anzahl der Tastendrucke aufgezeichnet werden konnten und es zu keiner expliziten Abfrage der generierten Wörter (wie bei der fTCD-Untersuchung) kam (siehe Abschnitte 3.1.2 sowie 4.3.3.1.).

6. FAZIT UND AUSBLICK

Das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit, mit dem Reimgenerierungsparadigma eine noch zuverlässigere und sicherere Alternative zum Wortgenerierungsparadigma bezüglich der Genauigkeit bei der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zu entwickeln, wird nur begrenzt erreicht. Beide Aufgabenbedingungen (Wort- und Reimgenerierung) aktivieren sprachrelevante Hirnareale (bei der fMRT) in nahezu gleicher Stärke und unterscheiden sich nicht bezüglich ihrer Lateralisierungsfähigkeit (fMRT und fTCD). Dieses Ergebnis bestätigt sich auch für unterschiedliche ROI-Radien und unabhängig von der Art der fMRT-Lateralitätsberechnung (Voxelcount- und Fernández-Ansatz). Nur bei der Betrachtung des t -Schwellenwertes, ab dem eine im Vorhinein festgelegte Voxelanzahl in den sprachrelevanten Arealen erreicht wird (über fMRT- $LI_{\text{Voxelcount}}$), findet sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Aufgabenbedingungen. Danach gelingt es mit der Reimgenerierungsaufgabe in weitaus stärkerem Ausmaß, Aktivierungen in sprachassoziierten Arealen auszulösen, was allerdings nicht mit einer klareren Lateralisierungsfähigkeit dieses Aufgabentyps verbunden zu sein scheint.

Des Weiteren konnte mit der fMRT-Studie gezeigt werden, dass unabhängig von der Generierungsbedingung zuverlässig linkshemisphärische inferior-frontale Hirnregionen bei der Bearbeitung der Sprachaufgaben beteiligt sind. Dieses Ergebnis bestätigte sich auf Versuchspersonen- sowie auf Gruppenebene.

Stärker als aufgrund des aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu diesem Themenbereich zu vermuten gewesen wäre, waren bei beiden Aufgabenbedingungen (Wort- und Reimgenerierung) rechtshemisphärische inferior-frontale Hirnregionen an den Sprachprozessen beteiligt. Offen bleibt in diesem Zusammenhang, in wieweit diese rechtshemisphärischen Aktivierungen direkt auf sprachliche Prozesse zurückzuführen sind. Obwohl die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sowie auch zahlreiche Publikationen verschiedener Forschergruppen eine Beteiligung dieser rechtshemisphärischen homologen Regionen an Sprachprozessen nahe legen, liefern klinische Untersuchungen an Patienten mit rechtsseitigem (frontalem) Schlaganfall keine Hinweise, dass diese Areale bei Sprachprozessen eine wesentliche Rolle spielen.

Eine weitere zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit betraf den Interaktionseffekt bei der Kombination einer phonologischen Aufgabe mit dem Element der Generierung.

Die in diesem Zusammenhang auf Gruppenebene signifikant aktivierte Region des linkshemisphärischen superior-frontalen Kortex scheint hierbei eine besondere Rolle zu spielen.

Die Befunde der vorliegenden Studie eröffnen die Möglichkeit, in Zukunft bei der nichtinvasiven präoperativen Sprachdiagnostik auf ein weiteres Aktivierungsparadigma zurückzugreifen, welches ebenso zuverlässig wie die Wortgenerierung sprachrelevante Areale aktiviert sowie die Hemisphärendominanz bei Sprachprozessen vorhersagen kann. Darüber hinaus werden mit dem Reimgenerierungsparadigma robustere Aktivierungen evoziert, was sich insbesondere bei Versuchspersonen oder Patienten mit sehr niedrigen Aktivierungsschwellen als ein entscheidender Vorteil erweisen könnte. In Bezug auf die Wahl der nichtinvasiven bildgebenden Untersuchungsmethode (fMRT oder fTCD) kann keine Überlegenheit eines Verfahrens festgestellt werden. Mit beiden Untersuchungsmethoden und unabhängig vom Aufgabenparadigma gelang es bei fast allen Versuchspersonen übereinstimmend, eine linkshemisphärische Sprachdominanz nachzuweisen.

Sofern lediglich die Dominanz einer Hemisphäre für Sprachprozesse bestimmt werden soll, kann man sich, ebenso gut wie auf fMRT-Befunde, auch auf das einfachere und ökonomischere Verfahren der fTCD verlassen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Studie war die Entwicklung eines Verfahrens zur sicheren und nichtinvasiven Bestimmung sprachrelevanter Hirnareale, welches den bisherigen Standardverfahren überlegen sein sollte. Dies hätte zum einen Implikationen für die neuropsychologische und medizinische Forschung, darüber hinaus wäre die Entwicklung eines solchen Verfahrens vor allem aber auch von hoher praktischer Relevanz: Vor Hirnoperationen, beispielsweise bei Epilepsie- oder Tumorpatienten, ist es notwendig, „eloquente“ Hirnregionen möglichst fehlerfrei zu identifizieren, um das Risiko von Sprachstörungen als Folge der OP so gering wie möglich zu halten. Die Standardverfahren (z. B. Wada-Test) zur Lokalisation der Sprachareale bergen jedoch erhebliche Risiken. Eine alternative Bestimmung der sprachrelevanten Areale über bildgebende Verfahren in Kombination mit Wortaufgaben wäre demgegenüber zwar weniger belastend, die Fehlerwahrscheinlichkeit von 8 bis 10% läge jedoch zu hoch, um im Einzelfall sichere Entscheidungen treffen zu können (Knecht, Deppe, Ebner et al., 1998; Wörmann et al., 2003).

In der vorliegenden Studie wurde in Anlehnung an die Arbeiten von Lurito und Mitarbeiter ein selbstentwickeltes phonologisches Reimgenerierungsparadigma mit dem klassischen Wortgenerierungsparadigma verglichen und hinsichtlich der Genauigkeit bei der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre bewertet (Krach & Hartje, 2006; Lurito et al., 2000). Verwendet wurden dazu die Daten von 38 Versuchspersonen einer fMRT-Studie sowie von 27 Versuchspersonen einer fTCD-Studie. Bei beiden Untersuchungen handelte es sich um männliche rechtshändige Versuchspersonen im Alter zwischen 20 und 40 Jahren. Für 16 Versuchspersonen lagen die Daten beider bildgebender Verfahren vor, womit auch ein Vergleich der Untersuchungsmethoden (fMRT und fTCD) vorgenommen werden konnte. Beim fMRT-Untersuchungsdesign handelte es sich um ein randomisiertes Blockdesign mit den Faktoren Wort- und Reimgenerierung sowie Wort- und Reimentscheidung. Bei der fTCD-Studie wurden Wort- und Reimgenerierung miteinander verglichen.

Die Ergebnisse beider bildgebender Verfahren (fMRT und fTCD) zeigen, dass es mit beiden Paradigmen und unabhängig von der Methode zur Lateralitätsberechnung (Voxelcount- vs. Fernández-Ansatz bei fMRT) in gleicher Weise gelingt, die sprachdominante Hemisphäre zuverlässig vorherzusagen. Dabei aktiviert das Generieren von

Reimen sprachrelevante Regionen in weitaus stärkerem Ausmaß, als dies durch die Wortgenerierung erreicht werden kann. Die Stärke der Lateralisation bleibt davon allerdings unbeeinflusst. Bei der Betrachtung der fMRT-Aktivierungen (auf Gruppen- sowie Versuchspersonenebene) findet sich bei der Wort- und Reimgenerierung in nahezu gleichem Umfang eine Beteiligung inferior-frontaler Hirnareale (BA 44/45 und 47). Stärker als erwartet fallen bei beiden Untersuchungsparadigmen die gleichzeitigen fMRT-Aktivierungen in den rechtshemisphärischen inferior-frontalen Hirnarealen aus.

Die Studie zeigt, dass mit beiden Aufgabentypen (Wort- und Reimgenerierung) und unabhängig vom bildgebenden Untersuchungsverfahren (fMRT und fTCD) in gleicher Weise eine zuverlässige Bestimmung sprachassoziierter Hirnregionen möglich ist. Die Reimgenerierungsaufgabe evokiert dabei allerdings signifikant stärkere Aktivierungen in sprachrelevanten Hirnarealen als die Wortgenerierungsaufgabe und könnte somit in Zukunft als ein alternatives Aktivierungsparadigma zur nichtinvasiven Bestimmung sprachassoziierter Hirnregionen eingesetzt werden. Insbesondere bei Versuchspersonen bzw. Patienten mit einer sehr niedrigen Aktivierungsschwelle würde sich dieser Aufgabentyp anbieten.

8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Radiofrequenzimpuls	5
Abbildung 2:	Hämodynamische Antwortfunktion (HRF)	8
Abbildung 3:	Beispiel einer Designmatrix	16
Abbildung 4:	<i>SPM T-Map</i>	17
Abbildung 5:	Zusammenhang zwischen Gütekriterien einer fMRT-LI-Analyse, Aktivitätsmaß und ROI-Analyse	23
Abbildung 6:	Kopfhalterung und Kugelgelenk der fTCD	24
Abbildung 7:	Fast-Fourier-Transformation (fTCD)	25
Abbildung 8:	Die drei großen Hirnarterien	26
Abbildung 9:	Hauptversorgungsgebiete der MCA	27
Abbildung 10:	Funktionelle Zentren im Versorgungsgebiet der MCA	27
Abbildung 11:	fTCD-Lateralitätsindizes bei 10 Wiederholungsmessungen an einer Probandin	29
Abbildung 12:	Vergleich der Lateralitätsindizes von 10 aufeinander folgenden fMRT und fTCD Messungen	30
Abbildung 13:	Vergleich der mittels fTCD und fMRT bestimmten Lateralitätsindizes für 9 Probanden	31
Abbildung 14:	Vergleich der mittels Wada-Test und fTCD bestimmten Lateralitätsindizes für 15 Patienten	31
Abbildung 15:	Der frontale Kortex	38
Abbildung 16:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Generierung	44
Abbildung 17:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung	46
Abbildung 18:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Entscheidung	48
Abbildung 19:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Generierung	51
Abbildung 20:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Entscheidung	55
Abbildung 21:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Generierung	57
Abbildung 22:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei Aufgaben ohne lexikalische, semantische oder phonologische Verarbeitung	59
Abbildung 23:	Sprachlateralisation bei Links- bzw. Rechtshändern	61
Abbildung 24:	Zusammenhang zwischen dem Grad der Händigkeit und der Sprachlateralisation	62
Abbildung 25:	Edinburgh-Händigkeitsinventar	73
Abbildung 26:	Apparaturen und Räumlichkeiten der fMRT-Studie	75
Abbildung 27:	Response-Boxen, Receiver-Box und Lichtwellenleiter	76
Abbildung 28:	Das faktorielle Design	87
Abbildung 29:	Berechnung der Interaktion	88
Abbildung 30:	Das faktorielle Design der vorliegenden Studie	89
Abbildung 31:	Untersuchungsablauf der vorliegenden Studie	91
Abbildung 32:	Versuchsablauf bei Wort- und Reimgenerierung	103
Abbildung 33:	Lage der Auswertungsintervalle für die Datenreduktion	108
Abbildung 34:	Intervall T_{int}	109

Abbildung 35: Anzahl mental generierter Wörter/Reime pro Versuchsperson während der Wort- und Reimgenerierung	111
Abbildung 36: Anzahl richtiger Antworten pro Versuchsperson während der Wort- und Reimentscheidung	112
Abbildung 37: Anzahl der Tastendrucke pro Aufgabenbedingung	113
Abbildung 38: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre beim Fernández-Ansatz	125
Abbildung 39: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre beim Voxelcount-Ansatz	135
Abbildung 40: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen Fernández- und Voxelcount-Ansatz	136
Abbildung 41: Aktivierungen Kontrast 1: „Wortgenerierung minus Ruhe“	138
Abbildung 42: Aktivierungen Kontrast 2: „Reimgenerierung minus Ruhe“	139
Abbildung 43: Aktivierungen Kontrast 4: „Reim- minus Wortgenerierung“	141
Abbildung 44: Aktivierungen Kontrast 11: „Interaktion“	147
Abbildung 45: Anzahl der Tastendrucke pro Versuchsperson während der Wort- und Reimgenerierung	149
Abbildung 46: Blutflussveränderung in linker und rechter Hemisphäre über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung	150
Abbildung 47: fTCD-Aktivierungsindex (fTCD-AI) über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung	151
Abbildung 48: fTCD-Lateralitätsindex (fTCD-LI) über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung	152
Abbildung 49: fTCD-LI über alle vier Intervalle bei Wort- und Reimgenerierung in der Substichprobe	154
Abbildung 50: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen fMRT- $LI_{\text{Fernández}}$ und fTCD-LI	156
Abbildung 51: Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen fMRT- $LI_{\text{Voxelcount}}$ und fTCD-LI	157
Abbildung 52: Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung; Kontraste „konkrete Wörter vs. baseline“ und „abstrakte Wörter vs. baseline“	172

9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Vergleichende Bewertung von fMRT und fTCD	33
Tabelle 2:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Generierung	43
Tabelle 3:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei lexikalischer Entscheidung	45
Tabelle 4:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Entscheidung	47
Tabelle 5:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei semantischer Generierung	49-50
Tabelle 6:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Entscheidung	53-54
Tabelle 7:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei phonologischer Generierung	56
Tabelle 8:	Linkshemisphärische Aktivierungen bei Aufgaben ohne lexikalische, semantische oder phonologische Verarbeitung	58
Tabelle 9:	Reimtriggerwörter der fMRT-Studie	86
Tabelle 10:	Berechnete Kontraste der vorliegenden Studie	95
Tabelle 11:	Reimtriggerwörter der fTCD-Studie	104
Tabelle 12:	Verwendete Filtereinstellungen (fTCD)	106
Tabelle 13:	Linkshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Wortgenerierung (Kontrast 1)	115
Tabelle 14:	Rechtshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Wortgenerierung (Kontrast 1)	116
Tabelle 15:	Linkshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Reimgenerierung (Kontrast 2)	118
Tabelle 16:	Rechtshemisphärische fMRT-Aktivierungen bei der Reimgenerierung (Kontrast 2)	120
Tabelle 17:	Individuelle Lateralitätsindizes nach Fernández für Kontrast 1 „Wortgenerierung minus Ruhe“	122
Tabelle 18:	Individuelle Lateralitätsindizes nach Fernández für Kontrast 2 „Reimgenerierung minus Ruhe“	123
Tabelle 19:	Individuelle Lateralitätsindizes nach Voxelcount-Ansatz für Kontrast 1: „Wortgenerierung minus Ruhe“	126
Tabelle 20:	Individuelle Lateralitätsindizes nach Voxelcount-Ansatz für Kontrast 2: „Reimgenerierung minus Ruhe“	130
Tabelle 21:	<i>t</i> -Statistik Kontraste 1 und 2: „Wortgenerierung minus Ruhe“ und „Reimgenerierung minus Ruhe“	137
Tabelle 22:	<i>t</i> -Statistik Kontrast 4: „Reim- minus Wortgenerierung“	140
Tabelle 23:	<i>t</i> -Statistik Kontraste 5 und 6 : „Wortentscheidung minus Ruhe“ und „Reimentscheidung minus Ruhe“	142
Tabelle 24:	<i>t</i> -Statistik Kontraste 7 und 8: „Wort- minus Reimaufgaben“ und Reim- minus Wortaufgaben“	143
Tabelle 25:	<i>t</i> -Statistik Kontraste 9 und 10: „Generierung minus Entscheidung“ und „Entscheidung minus Generierung“	144
Tabelle 26:	<i>t</i> -Statistik Kontrast 11: „Interaktion“	146
Tabelle 27:	Übereinstimmung in der Vorhersage der sprachdominanten Hemisphäre zwischen fTCD-LI, fMRT-LI _{Fernández} und fMRT-LI _{Voxelcount} bei Wort- und Reimgenerierung	157

10. LITERATUR

- Aaslid, R. (1987). Visually evoked dynamic blood flow response of the human cerebral circulation. *Stroke*, 18(4), 771-775.
- Adcock, J. E., Wise, R. G., Oxbury, J. M., Oxbury, S. M., & Matthews, P. M. (2003). Quantitative fMRI assessment of the differences in lateralization of language-related brain activation in patients with temporal lobe epilepsy. *NeuroImage*, 18(2), 423-438.
- Aertsen, A., & Preissl, H. (1991). Dynamics of activity and connectivity in physiological neuronal networks. In H. Schuster (Ed.), *Nonlinear Dynamics and Neuronal Networks* (pp. 281-301). Weinheim: VCH Verlag.
- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (2000). Experimental design for brain fMRI. In C. T. W. Moonen & P. A. Bandettini (Eds.), *Functional MRI* (pp. 369-380). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Arnolds, B. J., & von Reutern, G. M. (1986). Transcranial Doppler sonography. Examination technique and normal reference values. *Ultrasound Med Biol*, 12(2), 115-123.
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (1997). *Spatial transformation of images*, from <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/course/notes97/CH2.pdf>
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2000). Image registration. In C. T. W. Moonen & P. A. Bandettini (Eds.), *Functional MRI* (pp. 285-299). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Baciu, M., Kahane, P., Minotti, L., Charnallet, A., David, D., Le Bas, J. F., et al. (2001). Functional MRI assessment of the hemispheric predominance for language in epileptic patients using a simple rhyme detection task. *Epileptic Disorders*, 3(3), 117-124.
- Bahn, M. M., Lin, W., Silbergeld, D. L., Miller, J. W., Kuppusamy, K., Cook, R. J., et al. (1997). Localization of language cortices by functional MR imaging compared with intracarotid amobarbital hemispheric sedation. *American Journal of Roentgenology*, 169(2), 575-579.
- Baumgartner, R. W., Mathis, J., Sturzenegger, M., & Mattle, H. P. (1994). A validation study on the intraobserver reproducibility of transcranial color-coded duplex sonography velocity measurements. *Ultrasound Med Biol*, 20(3), 233-237.

- Baxter, L. C., Saykin, A. J., Flashman, L. A., Johnson, S. C., Guerin, S. J., Babcock, D. R., et al. (2003). Sex differences in semantic language processing: a functional MRI study. *Brain and Language, 84*(2), 264-272.
- Bay-Hansen, J., Ravn, T., & Knudsen, G. M. (1997). Application of interhemispheric index for transcranial Doppler sonography velocity measurements and evaluation of recording time. *Stroke, 28*(5), 1009-1014.
- Benson, R. R., FitzGerald, D. B., LeSueur, L. L., Kennedy, D. N., Kwong, K. K., Buchbinder, B. R., et al. (1999). Language dominance determined by whole brain functional MRI in patients with brain lesions. *Neurology, 52*(4), 798-809.
- Billingsley, R. L., McAndrews, M. P., Crawley, A. P., & Mikulis, D. J. (2001). Functional MRI of phonological and semantic processing in temporal lobe epilepsy. *Brain, 124*(Pt 6), 1218-1227.
- Binder, J. R. (1997). Neuroanatomy of language processing studied with functional MRI. *Clinical Neuroscience, 4*(2), 87-94.
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Cox, R. W., Rao, S. M., & Prieto, T. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience, 17*(1), 353-362.
- Binder, J. R., Swanson, S. J., Hammeke, T. A., Morris, G. L., Mueller, W. M., Fischer, M., et al. (1996). Determination of language dominance using functional MRI: a comparison with the Wada test. *Neurology, 46*(4), 978-984.
- Blume, W. T., Grabow, J. D., Darley, F. L., & Aronson, A. E. (1973). Intracarotid amobarbital test of language and memory before temporal lobectomy for seizure control. *Neurology, 23*(8), 812-819.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2004). Development of brain mechanisms for processing orthographic and phonologic representations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*(7), 1234-1249.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D., et al. (2003). Neural development of selective attention and response inhibition. *NeuroImage, 20*(2), 737-751.
- Brammer, M. J. (2001). Head motion and its correction. In P. Jezzard, P. M. Matthews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An introduction to methods*. (pp. 243-250). New York: Oxford University Press Inc.

- Brannen, J. H., Badie, B., Moritz, C. H., Quigley, M., Meyerand, M. E., & Haughton, V. M. (2001). Reliability of functional MR imaging with word-generation tasks for mapping Broca's area. *American Journal of Neuroradiology*, 22(9), 1711-1718.
- Brazdil, M., Chlebus, P., Mikl, M., Pazourkova, M., Krupa, P., & Rektor, I. (2005). Reorganization of language-related neuronal networks in patients with left temporal lobe epilepsy - an fMRI study. *European Journal of Neurology*, 12(4), 268-275.
- Brown, T. T., Lugar, H. M., Coalson, R. S., Miezin, F. M., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2005). Developmental changes in human cerebral functional organization for word generation. *Cerebral Cortex*, 15(3), 275-290.
- Büchel, C., Price, C., Frackowiak, R. S. J., & Friston, K. J. (1998). Different activation patterns in the visual cortex of late and congenitally blind subjects. *Brain*, 121, 409-419.
- Büchel, C., & Weiller, C. (2002). Bildgebende und elektrische/magnetische Verfahren in der Neuropsychologie. In W. Hartje & K. Poeck (Eds.), *Klinische Neuropsychologie* (pp. 52-66). Stuttgart: Thieme Verlag.
- Buckner, R. L., Raichle, M. E., & Petersen, S. E. (1995). Dissociation of human prefrontal cortical areas across different speech production tasks and gender groups. *Journal of Neurophysiology*, 74(5), 2163-2173.
- Bullmore, E. T., & Suckling, J. (2001). Functional magnetic resonance imaging. *International Review of Psychiatry*, 13(1).
- Burton, M. W., Small, S. L., & Blumstein, S. E. (2000). The role of segmentation in phonological processing: an fMRI investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(4), 679-690.
- Calabrese, P., Markowitsch, H. (2001). Wortgenerierung bei Bilingualen-eine fMRT-Studie mit Implikationen für Sprach- und Gedächtnisprozesse. *Fortschritte der Neurologie-Psychiatrie*, 69, 42-50.
- Calvert, G. A., Brammer, M. J., Morris, R. G., Williams, S. C., King, N., & Matthews, P. M. (2000). Using fMRI to study recovery from acquired dysphasia. *Brain and Language*, 71(3), 391-399.
- Chen, L. M. (2004). Unpublished thesis, Universität Bielefeld, Bielefeld.
- Coney, J. (2002). Lateral asymmetry in phonological processing: relating behavioral measures to neuroimaged structures. *Brain and Language*, 80(3), 355-365.

- Crossman, D. L., & Polich, J. (1988). Hemispheric differences for orthographic and phonological processing. *Brain and Language*, 35(2), 301-312.
- Crosson, B., Benefield, H., Cato, M. A., Sadek, J. R., Moore, A. B., Wierenga, C. E., et al. (2003). Left and right basal ganglia and frontal activity during language generation: contributions to lexical, semantic, and phonological processes. *J Int Neuropsychol Soc*, 9(7), 1061-1077.
- Crosson, B., Sadek, J. R., Bobholz, J. A., Gokcay, D., Mohr, C. M., Leonard, C. M., et al. (1999). Activity in the paracingulate and cingulate sulci during word generation: an fMRI study of functional anatomy. *Cerebral Cortex*, 9(4), 307-316.
- Crosson, B., Sadek, J. R., Maron, L., Gokcay, D., Mohr, C. M., Auerbach, E. J., et al. (2001). Relative shift in activity from medial to lateral frontal cortex during internally versus externally guided word generation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(2), 272-283.
- Cuenod, C. A., Bookheimer, S. Y., Hertz-Pannier, L., Zeffiro, T. A., Theodore, W. H., & Le Bihan, D. (1995). Functional MRI during word generation, using conventional equipment: a potential tool for language localization in the clinical environment. *Neurology*, 45(10), 1821-1827.
- Dale, A. M. (1999). Optimal experimental design for event-related fMRI. *Human Brain Mapping*, 8(2-3), 109-114.
- Dale, A. M., & Buckner, R. L. (1997). Selective averaging of rapidly presented individual trials using fMRI. *Human Brain Mapping*, 5, 329-340.
- de Haan, B., & Rorden, C. (2004). *An introduction to fMRI*, from www.sph.sc.edu/comd/rorden/fmri_guide/fmri_guide.pdf
- de Zubicaray, G. I., Williams, S. C., Wilson, S. J., Rose, S. E., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., et al. (1998). Prefrontal cortex involvement in selective letter generation: a functional magnetic resonance imaging study. *Cortex*, 34(3), 389-401.
- Deblaere, K., Backes, W. H., Hofman, P., Vandemaele, P., Boon, P. A., Vonck, K., et al. (2002). Developing a comprehensive presurgical functional MRI protocol for patients with intractable temporal lobe epilepsy: a pilot study. *Neuroradiology*, 44(8), 667-673.
- Deblaere, K., Boon, P. A., Vandemaele, P., Tieleman, A., Vonck, K., Vingerhoets, G., et al. (2004). MRI language dominance assessment in epilepsy patients at 1.0 T:

- region of interest analysis and comparison with intracarotid amygdala testing. *Neuroradiology*, 46(6), 413-420.
- Demb, J. B., Desmond, J. E., Wagner, A. D., Vaidya, C. J., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity. *The Journal of Neuroscience*, 15(9), 5870-5878.
- Demonet, J. F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J. L., Wise, R., et al. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115 (Pt 6), 1753-1768.
- Deppe, M. (1999). AVERAGE. The analysis tool for fTCD: Introduction and reference manual (Version Manual 1.3). Postfach 8428, D-48045 Münster: Werkbank Multimedia GmbH.
- Deppe, M. (2000). *Funktionelle Transkranielle Doppler-Sonographie. Methodik zur Erfassung ereignisbezogener Gehirnaktivitätsveränderungen*. Unpublished Inaugural-Dissertation, Universität Münster.
- Deppe, M. (2002). AVERAGE - The integrated analysis tool for "fTCD-studies" (Version Commercial Software Release V1.85e). Westfälische Wilhelms-Universität Münster.
- Deppe, M., Knecht, S., Henningsen, H., & Ringelstein, E. B. (1997). AVERAGE: a Windows program for automated analysis of event related cerebral blood flow. *Journal of Neuroscience Methods*, 75(2), 147-154.
- Deppe, M., Knecht, S., Papke, K., Henningsen, H., & Ringelstein, E. (1999). FTCD: Vergleich mit der funktionellen Magnetresonanztomographie. *Klinische Neurophysiologie*, 30, 292-298.
- Deppe, M., Knecht, S., Papke, K., Lohmann, H., Fleischer, H., Heindel, W., et al. (2000). Assessment of hemispheric language lateralization: a comparison between fMRI and fTCD. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 20(2), 263-268.
- Deppe, M., Ringelstein, E. B., & Knecht, S. (2004). The investigation of functional brain lateralization by transcranial Doppler sonography. *NeuroImage*, 21(3), 1124-1146.
- Desmond, J. E., Sum, J. M., Wagner, A. D., Demb, J. B., Shear, P. K., Glover, G. H., et al. (1995). Functional MRI measurement of language lateralization in Wada-tested patients. *Brain*, 118 (Pt 6), 1411-1419.

- Donaldson, D. L., & Buckner, R. L. (2001). Effective paradigm design. In P. Jezzard, P. M. Matthews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An introduction to methods* (pp. 177-195). New York: Oxford University Press Inc.
- Droste, D. W., Harders, A. G., & Rastogi, E. (1989a). A transcranial Doppler study of blood flow velocity in the middle cerebral arteries performed at rest and during mental activities. *Stroke*, *20*(8), 1005-1011.
- Droste, D. W., Harders, A. G., & Rastogi, E. (1989b). Two transcranial Doppler studies on blood flow velocity in both middle cerebral arteries during rest and the performance of cognitive tasks. *Neuropsychologia*, *27*(10), 1221-1230.
- Duschek, S., & Schandry, R. (2003). Functional transcranial Doppler sonography as a tool in psychophysiological research. *Psychophysiology*, *40*(3), 436-454.
- Evans, A. C., Kamber, M., Collins, D. L., & MacDonald, D. (1994). An MRI-based probabilistic atlas of neuroanatomy. In S. Shorvon (Ed.), *Magnetic Resonance Scanning and Epilepsy* (pp. 263-274). New York: Plenum Press.
- Fernández, G., de Greiff, A., von Oertzen, J., Reuber, M., Lun, S., Klaver, P., et al. (2001). Language mapping in less than 15 minutes: real-time functional MRI during routine clinical investigation. *NeuroImage*, *14*(3), 585-594.
- Fernández, G., Specht, K., Weis, S., Tendolkar, I., Reuber, M., Fell, J., et al. (2003). Intrasubject reproducibility of presurgical language lateralization and mapping using fMRI. *Neurology*, *60*(6), 969-975.
- Fiez, J. A. (1997). Phonology, semantics, and the role of the left inferior prefrontal cortex. *Human Brain Mapping*, *5*(2), 79-83.
- Freund, H. J. (1996). The motor system: distributed function and dysfunction. *Neuroforum, Sonderausgabe* *1*(15).
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Price, C. J., Buchel, C., & Worsley, K. J. (1999). Multisubject fMRI studies and conjunction analyses. *NeuroImage*, *10*(4), 385-396.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., & Worsley, K. J. (1999). How many subjects constitute a study? *NeuroImage*, *10*(1), 1-5.
- Friston, K. J., Price, C. J., Fletcher, P., Moore, C., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (1996). The trouble with cognitive subtraction. *NeuroImage*, *4*(2), 97-104.
- Frith, C. D., Friston, K. J., Liddle, P. F., & Frackowiak, R. S. (1991). A PET study of word finding. *Neuropsychologia*, *29*(12), 1137-1148.

- Frost, J. A., Binder, J. R., Springer, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S., Rao, S. M., et al. (1999). Language processing is strongly left lateralized in both sexes. Evidence from functional MRI. *Brain*, *122* (Pt 2), 199-208.
- Fu, C. H., Morgan, K., Suckling, J., Williams, S. C., Andrew, C., Vythelingum, G. N., et al. (2002). A functional magnetic resonance imaging study of overt letter verbal fluency using a clustered acquisition sequence: greater anterior cingulate activation with increased task demand. *NeuroImage*, *17*(2), 871-879.
- Gabrieli, J. D., Desmond, J. E., Demb, J. B., Wagner, A. D., Stone, M. V., Vaidya, C. J., et al. (1996). Functional magnetic resonance imaging of semantic memory processes in the frontal lobes. *Psychological Science*, *7*(5), 278-283.
- Gabrieli, J. D., Poldrack, R. A., & Desmond, J. E. (1998). The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*(3), 906-913.
- Gaillard, W. D., Balsamo, L., Xu, B., McKinney, C., Papero, P. H., Weinstein, S., et al. (2004). fMRI language task panel improves determination of language dominance. *Neurology*, *63*(8), 1403-1408.
- Gaillard, W. D., Hertz-Pannier, L., Mott, S. H., Barnett, A. S., LeBihan, D., & Theodore, W. H. (2000). Functional anatomy of cognitive development: fMRI of verbal fluency in children and adults. *Neurology*, *54*(1), 180-185.
- Gaillard, W. D., Sachs, B. C., Whitnah, J. R., Ahmad, Z., Balsamo, L. M., Petrella, J. R., et al. (2003). Developmental aspects of language processing: fMRI of verbal fluency in children and adults. *Human Brain Mapping*, *18*(3), 176-185.
- Häcker, H., & Stapf, K. H. (1998). *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Göttingen: Verlag Hans Huber.
- Hagoort, P., Indefrey, P., Brown, C., Herzog, H., Steinmetz, H., & Seitz, R. J. (1999). The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords: A PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(4), 383-398.
- Haller, S., Radue, E. W., Erb, M., Grodd, W., & Kircher, T. (2005). Overt sentence production in event-related fMRI. *Neuropsychologia*, *43*(5), 807-814.
- Hartje, W. (2002). Funktionelle Asymmetrie der Großhirnhemisphären. In W. Hartje & K. Poeck (Eds.), *Klinische Neuropsychologie*. Stuttgart: Thieme.
- Hausmann, M., & Gunturkun, O. (1999). Sex differences in functional cerebral asymmetries in a repeated measures design. *Brain and Cognition*, *41*(3), 263-275.

- Heeger, D. J., & Ress, D. (2002). What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nature reviews. Neuroscience*, 3(2), 142-151.
- Herbster, A. N., Mintun, M. A., Nebes, R. D., & Becker, J. T. (1997). Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Human Brain Mapping*, 5(2), 84-92.
- Holland, S. K., Plante, E., Weber Byars, A., Strawsburg, R. H., Schmithorst, V. J., & Ball, W. S., Jr. (2001). Normal fMRI brain activation patterns in children performing a verb generation task. *NeuroImage*, 14(4), 837-843.
- Horowitz, A. L. (1995). *MRI physics for radiologists*. New York: Springer Verlag.
- Horwitz, B., Friston, K. J., & Taylor, J. G. (2000). Neural modelling and functional brain imaging: An overview. *Neural Networks*, 13, 829-846.
- Hunter, K. E., Blaxton, T. A., Bookheimer, S. Y., Figlozzi, C., Gaillard, W. D., Grandin, C., et al. (1999). (15)O water positron emission tomography in language localization: a study comparing positron emission tomography visual and computerized region of interest analysis with the Wada test. *Annals of Neurology*, 45(5), 662-665.
- Jansen, A., Floel, A., Deppe, M., van Randenborgh, J., Drager, B., Kanowski, M., et al. (2004). Determining the hemispheric dominance of spatial attention: a comparison between fTCD and fMRI. *Human Brain Mapping*, 23(3), 168-180.
- Jansen, A., Menke, R., Sommer, J., Forster, A. F., Hemplemann, J., Bruchmann, S., et al. (submitted). The assessment of brain lateralization in functional MRI studies - robustness and reproducibility-.
- Jennum, P., Friberg, L., Fuglsang-Frederiksen, A., & Dam, M. (1994). Speech localization using repetitive transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, 44(2), 269-273.
- Jezzard, P., & Clare, S. (2001). Principles of nuclear magnetic resonance and MRI. In P. Jezzard, P. M. Matthews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An introduction to methods*. (pp. 67-92). New York: Oxford University Press Inc.
- Kang, A. M., Constable, R. T., Gore, J. C., & Avrutin, S. (1999). An event-related fMRI study of implicit phrase-level syntactic and semantic processing. *NeuroImage*, 10(5), 555-561.
- Kaplan, A. M., Bandy, D. J., Manwaring, K. H., Chen, K., Lawson, M. A., Moss, S. D., et al. (1999). Functional brain mapping using positron emission tomography scanning in preoperative neurosurgical planning for pediatric brain tumors. *Journal of Neurosurgery*, 91(5), 797-803.

- Kapur, S., Rose, R., Liddle, P. F., Zipursky, R. B., Brown, G. M., Stuss, D., et al. (1994). The role of the left prefrontal cortex in verbal processing: semantic processing or willed action? *Neuroreport*, 5(16), 2193-2196.
- Kemmotsu, N., Villalobos, M. E., Gaffrey, M. S., Courchesne, E., & Muller, R. A. (2005). Activity and functional connectivity of inferior frontal cortex associated with response conflict. *Brain Res Cogn Brain Res*, 24(2), 335-342.
- Kennan, R. P., Kim, D., Maki, A., Koizumi, H., & Constable, R. T. (2002). Non-invasive assessment of language lateralization by transcranial near infrared optical topography and functional MRI. *Human Brain Mapping*, 16(3), 183-189.
- Kertesz, A., & Sheppard, A. (1981). The epidemiology of aphasic and cognitive impairment in stroke: age, sex, aphasia type and laterality differences. *Brain*, 104(Pt 1), 117-128.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., Smith, A. M., Mendrek, A., Forster, B. B., & Hare, R. D. (1999). Neural pathways involved in the processing of concrete and abstract words. *Human Brain Mapping*, 7(4), 225-233.
- Kischka, U., Wolf, G., & Wallesch, C. W. (1997). *Methoden der Hirnforschung. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Klein, D., Milner, B., Zatorre, R. J., Meyer, E., & Evans, A. C. (1995). The neural substrates underlying word generation: a bilingual functional-imaging study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(7), 2899-2903.
- Klöppel, S., & Büchel, C. (2005). Alternatives to the Wada test: a critical view of functional magnetic resonance imaging in preoperative use. *Curr Opin Neurol*, 18(4), 418-423.
- Knake, S., Haag, A., Hamer, H. M., Dittmer, C., Bien, S., Oertel, W. H., et al. (2003). Language lateralization in patients with temporal lobe epilepsy: a comparison of functional transcranial Doppler sonography and the Wada test. *NeuroImage*, 19(3), 1228-1232.
- Knecht, S., Deppe, M., Drager, B., Bobe, L., Lohmann, H., Ringelstein, E., et al. (2000). Language lateralization in healthy right-handers. *Brain*, 123 (Pt 1), 74-81.
- Knecht, S., Deppe, M., Ebner, A., Henningsen, H., Huber, T., Jokeit, H., et al. (1998). Noninvasive determination of language lateralization by functional transcranial Doppler sonography: a comparison with the Wada test. *Stroke*, 29(1), 82-86.

- Knecht, S., Deppe, M., & Ringelstein, E. B. (1999). Determination of cognitive hemispheric lateralization by "functional" transcranial Doppler cross-validated by functional MRI. *Stroke*, 30(11), 2491-2492.
- Knecht, S., Deppe, M., Ringelstein, E. B., Wirtz, M., Lohmann, H., Drager, B., et al. (1998). Reproducibility of functional transcranial Doppler sonography in determining hemispheric language lateralization. *Stroke*, 29(6), 1155-1159.
- Knecht, S., Drager, B., Deppe, M., Bobe, L., Lohmann, H., Floel, A., et al. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123 Pt 12, 2512-2518.
- Knecht, S., Jansen, A., Frank, A., van Randenborgh, J., Sommer, J., Kanowski, M., et al. (2003). How atypical is atypical language dominance? *NeuroImage*, 18(4), 917-927.
- Krach, S. (2004). *Hemisphärenspezifische Aktivierung bei der mentalen Wort- und Reimgenerierung. Eine TCD-Studie*. Unpublished thesis, Universität Bielefeld.
- Krach, S., Chen, L. M., & Hartje, W. (2006). Comparison between visual half-field performance and cerebral blood flow changes as indicators of language dominance. *Laterality*, 11(2), 122-140.
- Krach, S., & Hartje, W. (2006). Comparison of hemispheric activation during mental word and rhyme generation using transcranial Doppler sonography. *Brain and Language*, 96(3), 269-279.
- Kuo, W. J., Yeh, T. C., Lee, J. R., Chen, L. F., Lee, P. L., Chen, S. S., et al. (2004). Orthographic and phonological processing of Chinese characters: an fMRI study. *NeuroImage*, 21(4), 1721-1731.
- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., et al. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(12), 5675-5679.
- Lai, S., Glover, G. H., & Haacke, E. M. (2000). Spatial selectivity of BOLD contrast: Effects in and around draining veins. In C. T. W. Moonen & P. A. Bandettini (Eds.), *Functional MRI* (pp. 221-231). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Lehericy, S., Cohen, L., Bazin, B., Samson, S., Giacomini, E., Rougetet, R., et al. (2000). Functional MR evaluation of temporal and frontal language dominance compared with the Wada test. *Neurology*, 54(8), 1625-1633.

- Li, P., Jin, Z., & Tan, L. H. (2004). Neural representations of nouns and verbs in Chinese: an fMRI study. *NeuroImage*, 21(4), 1533-1541.
- Liotti, M., Gay, C. T., & Fox, P. T. (1994). Functional imaging and language: evidence from positron emission tomography. *J Clin Neurophysiol*, 11(2), 175-190.
- Lohmann, H., Drager, B., Muller-Ehrenberg, S., Deppe, M., & Knecht, S. (2005). Language lateralization in young children assessed by functional transcranial Doppler sonography. *NeuroImage*, 24(3), 780-790.
- Lurito, J. T., & Dzemidzic, M. (2001). Determination of cerebral hemisphere language dominance with functional magnetic resonance imaging. *Neuroimaging Clinics of North America*, 11(2), 355-363, x.
- Lurito, J. T., Kareken, D. A., Lowe, M. J., Chen, S. H., & Mathews, V. P. (2000). Comparison of rhyming and word generation with fMRI. *Human Brain Mapping*, 10(3), 99-106.
- Maeda, H., Etani, H., Handa, N., Tagaya, M., Oku, N., Kim, B. H., et al. (1990). A validation study on the reproducibility of transcranial Doppler velocimetry. *Ultrasound Med Biol*, 16(1), 9-14.
- Maldjian, J. A., Laurienti, P. J., Driskill, L., & Burdette, J. H. (2002). Multiple reproducibility indices for evaluation of cognitive functional MR imaging paradigms. *American Journal of Neuroradiology*, 23(6), 1030-1037.
- Mansfield, P., & Maudsley, A. A. (1977). Medical imaging by NMR. *Br J Radiol*, 50(591), 188-194.
- Mathews, P. M. (2001). An introduction to functional magnetic resonance imaging of the brain. In P. Jezzard, P. M. Mathews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An introduction to methods* (pp. 3-34). New York: Oxford University Press Inc.
- McCarthy, G., Blamire, A. M., Rothman, D. L., Gruetter, R., & Shulman, R. G. (1993). Echo-planar magnetic resonance imaging studies of frontal cortex activation during word generation in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 90(11), 4952-4956.
- McGlone, J. (1980). Sex differences in human brain asymmetry: A critical survey. *Behavioural and Brain Sciences*, 3, 215-263.
- McGraw, P., Mathews, V. P., Wang, Y., & Phillips, M. D. (2001). Approach to functional magnetic resonance imaging of language based on models of language organization. *Neuroimaging Clinics of North America*, 11(2), 343-353, x.

- Mechelli, A., Friston, K. J., & Price, C. J. (2000). The effects of presentation rate during word and pseudoword reading: a comparison of PET and fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 Suppl 2, 145-156.
- Mechelli, A., Gorno-Tempini, M. L., & Price, C. J. (2003). Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies, and limitations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 260-271.
- Menon, R. S., & Goodyear, B. G. (2001). Spatial and temporal resolution in fMRI. In P. Jezzard, P. M. Matthews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An Introduction to methods* (pp. 145-158). New York: Oxford University Press Inc.
- Milner, B. (1974). Sparing of language functions after early unilateral brain damage. In E. Eidelberg & D. G. Stein (Eds.), *Functional recovery after lesions in the nervous systems*. (Neurosci Res Progr Bull ed., Vol. 12, pp. 213-216).
- Mo, L., Liu, H. L., Jin, H., & Yang, Y. L. (2005). Brain activation during semantic judgment of Chinese sentences: A functional MRI study. *Human Brain Mapping*, 24(4), 305-312.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Palmer, E. D., Rosen, H. J., Ojemann, J. G., Buckner, R. L., Kelley, W. M., & Petersen, S. E. (2001). An event-related fMRI study of overt and covert word stem completion. *NeuroImage*, 14(1 Pt 1), 182-193.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331(6157), 585-589.
- Phelps, E. A., Hyder, F., Blamire, A. M., & Shulman, R. G. (1997). FMRI of the prefrontal cortex during overt verbal fluency. *Neuroreport*, 8(2), 561-565.
- Poldrack, R. A., Temple, E., Protopapas, A., Nagarajan, S., Tallal, P., Merzenich, M., et al. (2001). Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing: evidence from fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(5), 687-697.
- Poldrack, R. A., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage*, 10(1), 15-35.

- Price, C. J., Wise, R. J., & Frackowiak, R. S. (1996). Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 6(1), 62-70.
- Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., et al. (1996). Cerebral organization of component processes in reading. *Brain*, 119 (Pt 4), 1221-1238.
- Pujol, J., Deus, J., Losilla, J. M., & Capdevila, A. (1999). Cerebral lateralization of language in normal left-handed people studied by functional MRI. *Neurology*, 52(5), 1038-1043.
- Pujol, J., Vendrell, P., Deus, J., Kulisevsky, J., Marti-Vilalta, J. L., Garcia, C., et al. (1996). Frontal lobe activation during word generation studied by functional MRI. *Acta Neurologica Scandinavica*, 93(6), 403-410.
- Rasmussen, T., & Milner, B. (1977). The role of early left-brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 299, 355-369.
- Rausch, R., Silfvenius, H., Wieser, H., Dodrill, C., Meador, K., & Jones-Gotman, M. (1993). Intraarterial amobarbital procedures. In J. Engel (Ed.), *Surgical Treatment of the Epilepsies*. (pp. 341-357). New York: Raven Press.
- Rossell, S. L., Price, C. J., & Nobre, A. C. (2003). The anatomy and time course of semantic priming investigated by fMRI and ERPs. *Neuropsychologia*, 41(5), 550-564.
- Rullkötter, N. (2004). *Die Repräsentation traumatischer Erinnerungen bei Borderline-Persönlichkeitsstörung mit und ohne PTSD : eine fMRT Studie*. Unpublished thesis, University of Bielefeld.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1997). Phonological and orthographic components of word recognition. A PET-rCBF study. *Brain*, 120 (Pt 5), 739-759.
- Rutten, G. J., Ramsey, N. F., van Rijen, P. C., Alpherts, W. C., & van Veelen, C. W. (2002). FMRI-determined language lateralization in patients with unilateral or mixed language dominance according to the Wada test. *NeuroImage*, 17(1), 447-460.
- Rutten, G. J., Ramsey, N. F., van Rijen, P. C., & van Veelen, C. W. (2002). Reproducibility of fMRI-determined language lateralization in individual subjects. *Brain and Language*, 80(3), 421-437.

- Sabbah, P., Chassoux, F., Leveque, C., Landre, E., Baudoin-Chial, S., Devaux, B., et al. (2003). Functional MR imaging in assessment of language dominance in epileptic patients. *NeuroImage*, 18(2), 460-467.
- Sabsevitz, D. S., Swanson, S. J., Hammeke, T. A., Spanaki, M. V., Possing, E. T., Morris, G. L., 3rd, et al. (2003). Use of preoperative functional neuroimaging to predict language deficits from epilepsy surgery. *Neurology*, 60(11), 1788-1792.
- Sand, M., Merz, R., & Deppe, M. (1995-2003). Software ShowPics (Version 3.0a). Münster: Klinik und Poliklinik fuer Neurologie.
- Scannell, J. W., & Young, M. P. (1999). Neuronal population activity and functional imaging. *Proc Biol Sci*, 266(1422), 875-881.
- Schlösser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., Rusinek, H., Saarimaki, A., Stevenson, J., et al. (1998). Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 64(4), 492-498.
- Schmidt, P., Krings, T., Willmes, K., Roessler, F., Reul, J., & Thron, A. (1999). Determination of cognitive hemispheric lateralization by "functional" transcranial Doppler cross-validated by functional MRI. *Stroke*, 30(5), 939-945.
- Seghier, M. L., Lazeyras, F., Pegna, A. J., Annoni, J. M., Zimine, I., Mayer, E., et al. (2004). Variability of fMRI activation during a phonological and semantic language task in healthy subjects. *Human Brain Mapping*, 23(3), 140-155.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., et al. (1995). Sex differences in the functional organization of the brain for language. *Nature*, 373(6515), 607-609.
- Silvestrini, M., Troisi, E., Matteis, M., Cupini, L. M., & Caltagirone, C. (1995). Involvement of the healthy hemisphere in recovery from aphasia and motor deficit in patients with cortical ischemic infarction: a transcranial Doppler study. *Neurology*, 45(10), 1815-1820.
- Siok, W. T., Jin, Z., Fletcher, P., & Tan, L. H. (2003). Distinct brain regions associated with syllable and phoneme. *Human Brain Mapping*, 18(3), 201-207.
- Smith, S. M. (2001). Preparing fMRI data for statistical analysis. In P. Jezzard, P. M. Matthews & S. M. Smith (Eds.), *Functional MRI: An introduction to methods*. (pp. 229-241). New York: Oxford University Press Inc.

- Sommer, J., Deppe, M., Jansen, A., Steinsträter, O., Krach, S., Knecht, S., et al. (2004). A "Cheap to Build" and "Easy to Use" Response Box for fMRI-Experiments. Paper presented at the Human Brain Mapping Conference, Budapest.
- Specht, K., Holtel, C., Zahn, R., Herzog, H., Krause, B. J., Mottaghy, F. M., et al. (2003). Lexical decision of nonwords and pseudowords in humans: a positron emission tomography study. *Neurosci Lett*, 345(3), 177-181.
- Specht, K., Willmes, K., Shah, N. J., & Jancke, L. (2003). Assessment of reliability in functional imaging studies. *J Magn Reson Imaging*, 17(4), 463-471.
- Spreer, J., Quiske, A., Altenmüller, D. M., Arnold, S., Schulze-Bonhage, A., Steinhoff, B. J., et al. (2001). Unsuspected atypical hemispheric dominance for language as determined by fMRI. *Epilepsia*, 42(7), 957-959.
- Stroobant, N., & Vingerhoets, G. (2000). Transcranial Doppler ultrasonography monitoring of cerebral hemodynamics during performance of cognitive tasks: a review. *Neuropsychol Rev*, 10(4), 213-231.
- Szaflarski, J. P., Binder, J. R., Possing, E. T., McKiernan, K. A., Ward, B. D., & Hammeke, T. A. (2002). Language lateralization in left-handed and ambidextrous people: fMRI data. *Neurology*, 59(2), 238-244.
- Szatkowska, I., Grabowska, A., & Szymanska, O. (2000). Phonological and semantic fluencies are mediated by different regions of the prefrontal cortex. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, 60(4), 503-508.
- Totaro, R., Marini, C., Cannarsa, C., & Prencipe, M. (1992). Reproducibility of transcranial Doppler sonography: a validation study. *Ultrasound Med Biol*, 18(2), 173-177.
- Ugurbil, K., Toth, L., & Kim, D. S. (2003). How accurate is magnetic resonance imaging of brain function? *Trends Neurosci*, 26(2), 108-114.
- van der Kallen, B. F., Morris, G. L., Yetkin, F. Z., van Erning, L. J., Thijssen, H. O., & Haughton, V. M. (1998). Hemispheric language dominance studied with functional MR: preliminary study in healthy volunteers and patients with epilepsy. *American Journal of Neuroradiology*, 19(1), 73-77.
- Van Emde Boas, P. (1999). Wada and the sodium amytal test in the first (and last?) 50 years. *Journal of the History of the Neurosciences*, 8, 286-292.
- Vartanian, O., & Goel, V. (2005). Task constraints modulate activation in right ventral lateral prefrontal cortex. *NeuroImage*, 27(4), 927-933.

- Volz, K. G., Schubotz, R. I., & von Cramon, D. Y. (2004). Why am I unsure? Internal and external attributions of uncertainty dissociated by fMRI. *NeuroImage*, 21(3), 848-857.
- von Reutern, G. M., & von Büdingen, H. J. (2000). *Ultraschalldiagnostik der hirnersorgenden Arterien*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Vriens, E. M., Kraaier, V., Musbach, M., Wieneke, G. H., & van Huffelen, A. C. (1989). Transcranial pulsed Doppler measurements of blood velocity in the middle cerebral artery: reference values at rest and during hyperventilation in healthy volunteers in relation to age and sex. *Ultrasound Med Biol*, 15(1), 1-8.
- Wada, J., & Rasmussen, T. (1960). Intracarotid injection of sodium Amytal for the lateralization of cerebral speech dominance. *Journal of Neurosurgery*, 17, 266-282.
- Weiller, C., Chollet, F., Friston, K. J., Wise, R. J., & Frackowiak, R. S. (1992). Functional reorganization of the brain in recovery from striatocapsular infarction in man. *Annals of Neurology*, 31(5), 463-472.
- Weiller, C., Isensee, C., Rijntjes, M., Huber, W., Müller, S., Bier, D., et al. (1995). Recovery from Wernicke's aphasia: a positron emission tomographic study. *Annals of Neurology*, 37(6), 723-732.
- Wood, A. G., Harvey, A. S., Wellard, R. M., Abbott, D. F., Anderson, V., Kean, M., et al. (2004). Language cortex activation in normal children. *Neurology*, 63(6), 1035-1044.
- Wörmann, F. G., Jokeit, H., Luerding, R., Freitag, H., Schulz, R., Guertler, S., et al. (2003). Language lateralization by Wada test and fMRI in 100 patients with epilepsy. *Neurology*, 61(5), 699-701.
- Xiong, J., Rao, S., Gao, J. H., Woldorff, M., & Fox, P. T. (1998). Evaluation of hemispheric dominance for language using functional MRI: a comparison with positron emission tomography. *Human Brain Mapping*, 6(1), 42-58.
- Xu, B., Grafman, J., Gaillard, W. D., Ishii, K., Vega-Bermudez, F., Pietrini, P., et al. (2001). Conjoint and extended neural networks for the computation of speech codes: the neural basis of selective impairment in reading words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 11(3), 267-277.
- Yetkin, F. Z., Hammeke, T. A., Swanson, S. J., Morris, G. L., Mueller, W. M., McAuliffe, T. L., et al. (1995). A comparison of functional MR activation patterns during

silent and audible language tasks. *American Journal of Neuroradiology*, 16(5), 1087-1092.

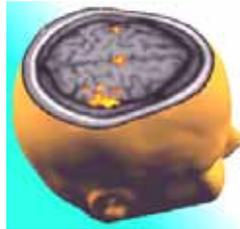
Yetkin, F. Z., Swanson, S., Fischer, M., Akansel, G., Morris, G., Mueller, W., et al. (1998). Functional MR of frontal lobe activation: comparison with Wada language results. *American Journal of Neuroradiology*, 19(6), 1095-1098.

Zarahn, E., Aguirre, G., & D'Esposito, M. (1997). A trial-based experimental design for fMRI. *NeuroImage*, 6(2), 122-138.

11. ANHANG

Anhang I.: Aushang in der Universität ("Suche Versuchspersonen")

Versuchspersonen für fMRI-Studie in Bielefeld gesucht!

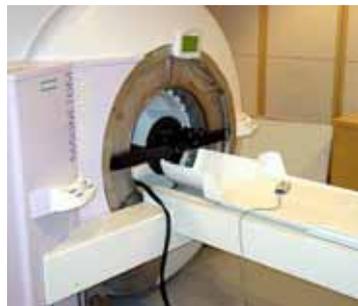


Erfüllst Du folgende Bedingungen???

- männlich
- rechtshändig
- Deutsch als Muttersprache
- Normale Sehfähigkeit (oder korrigiert durch Kontaktlinsen; Brille ist nicht möglich!)
- Keine neurologische oder psychiatrische Erkrankung/Störung
- Alter zwischen 20 - 40 Jahren
- Keine Angst vor engen Räumen/Röhren!

Dann könntest Du an der Studie teilnehmen!

Bei der Studie handelt es sich um vier Sprachaufgaben, die zu bearbeiten sind, während Du im Kernspintomographen liegst. Insgesamt dauert die Durchführung der Untersuchung 60-90 Minuten. Du bekommst, je nachdem wie lange es im Endeffekt dauert, zwischen 15-20 €. Kernspintomographie ist ein nichtinvasives Verfahren bei dem kein Gesundheitsrisiko besteht! Wenn Du Interesse hast, melde Dich bitte bei mir in Raum S4-137 (Tel.: 106 3099) oder per E-mail unter soerenkrach@web.de!
Vielen Dank!!



Anhang II.: Information über die Studie (Teil 1)

Information über die Studie

1. Titel

Hemisphärenspezifische Aktivierung bei der mentalen Reim- und Wortgenerierung

2. Hauptverantwortliche für die Studie

Sören Krach & Wolfgang Hartje
Universität Bielefeld, Abteilung für Psychologie
Arbeitseinheit Klinische Psychologie/Neuropsychologie

3. Zielsetzung der Studie

Ziel der Studie ist die Entwicklung und Testung eines Verfahrens zur sicheren Bestimmung sprachrelevanter Hirnareale. Dies hat zum einen Implikationen für die neuropsychologische und medizinische Forschung, darüber hinaus ist die Entwicklung eines solchen Verfahrens vor allem aber auch von einer hohen praktischen Bedeutung: Vor Hirnoperationen, beispielsweise bei Epilepsie- oder Tumorpatienten, ist es notwendig, sprachassoziierte Hirnregionen möglichst fehlerfrei zu identifizieren, um das Risiko von Sprachstörungen als Folge der OP so gering wie möglich zu halten. Die aktuellen Standardverfahren zur Bestimmung der Sprachareale (z.B. der Wada-Test) bergen jedoch erhebliche Risiken. Eine alternative Bestimmung sprachassoziiertter Regionen über bildgebende Verfahren (wie z.B. funktionelle Kernspintomographie) in Kombination mit verschiedenen Sprachparadigmen wäre demgegenüber weit weniger belastend.

4. Was passiert während der Untersuchung?

Während der gesamten Untersuchung wirst Du in der Magnettröhre des Kernspintomographen liegen. Über Deinem Kopf befindet sich ein zweifach gebrochenes Spiegelsystem, das es Dir erlaubt, im Liegen aus der Röhre zu sehen. Am Ende der Liege ist eine Plexiglaswand befestigt, auf der die Instruktionen und Stimuli für die Untersuchung erscheinen. Es ist wichtig, dass Du während der gesamten Untersuchung so ruhig wie möglich liegst, da die Aufnahmen sehr sensibel auf Bewegungen reagieren. Leichte Arm- und Beinbewegungen zwischen den Scans (Aufnahmen) sind erlaubt (Du erkennst die Zeitpunkte der Aufnahmen an den lauten Klopfgeräuschen im Scanner), der Kopf muss allerdings während der gesamten Zeit in der gleichen Position bleiben und darf nicht bewegt werden. Zur Sicherheit wird während der Aufnahmen ein Notschalter neben Dir liegen, der jederzeit betätigt werden kann. Ein Teil der Untersuchung (die funktionelle Messung) besteht aus vier Sprachaufgaben, die visuell auf der Plexiglasscheibe am Ende der Liege erscheinen. Die Aufgaben mit den jeweiligen Instruktionen erscheinen in zufälliger Reihenfolge. Hierbei handelt es sich um eine Reim- und Wortentscheidungsaufgabe und um eine Reim- und Wortgenerierungsaufgabe. Während der Untersuchung hältst Du in jeder Hand eine Antworttaste, die bei Bearbeitung der Aufgaben gleichzeitig gedrückt werden sollen (genauere Instruktionen zu den jeweiligen Aufgaben und wann genau die Antworttasten betätigt werden sollen, gibt es kurz vor der Untersuchung). Das Drücken der Antworttasten wird an einem angeschlossenen Computer registriert, um so einen Rückschluss über Deine Leistung zu bekommen. Im zweiten Teil der Untersuchung werden strukturelle Aufnahmen gemacht, bei denen Du einfach nur ruhig liegen musst und keine Aufgaben zu bearbeiten hast.

5. Dauer der Untersuchung

Die Untersuchung dauert ungefähr 60-90 Minuten.

Anhang III.: Information über die Studie (Teil 2)

Information über die Teilnehmer

Wer darf teilnehmen?

Teilnehmen können männliche, rechtshändige Probanden zwischen 20-40 Jahren deren Muttersprache Deutsch ist. Weiterhin solltest Du eine normale Sehstärke haben, die aber gegebenenfalls auch durch Kontaktlinsen (Brille ist nicht möglich!) korrigiert werden kann.

Wer darf nicht teilnehmen?

Wegen des starken Magnetfeldes, dem man während der Studie ausgesetzt ist, können Versuchspersonen mit Herzschrittmacher und Metallimplantaten im Kopf (Aneurysma Clips) nicht teilnehmen. Um auszuschließen, dass Metallfragmente o.ä. in Deinem Körper sind, ist es wichtig, dass Du uns vor der Untersuchung über jegliche Operationen, die bei Dir in der Vergangenheit durchgeführt wurden, informierst. Außerdem solltest Du keine Angst vor engen Räumen oder Röhren haben. Teilnehmer, bei denen in der Vergangenheit eine neurologische oder psychiatrische Störung diagnostiziert wurde, werden ebenso von der Studie ausgeschlossen wie Probanden mit starkem Medikamenten- oder Drogenmissbrauch. Wenn Du Dir bei irgendetwas nicht sicher bist, frag bitte vor der Untersuchung noch einmal genauer nach! Piercings, Ohringe, Schlüssel, Kreditkarten o.ä. müssen vor der Studie abgenommen bzw. abgelegt werden.

Hinweis: es ist sehr wichtig, dass Du dem Untersuchungsleiter ausführliche und ehrliche Informationen über Deine Gesundheit und medizinische Geschichte gibst!

Risiken und Nebenwirkungen

Bekannte Risiken einer fMRI-Untersuchung sind:

- Ferromagnetische oder metallische Objekte können vom Magneten angezogen werden (Metallimplantate, Aneurysma Clips, Piercings, etc)
- Der Scanner verursacht laute Klopfgeräusche, die auf Dauer zu Hörschädigungen führen können, sofern man nicht geschützt ist (Du erhältst während der Untersuchung einen Kopfhörer, der die Klopfgeräusche stark vermindert)

Weitere als die oben beschriebenen Risiken bestehen nicht. Es gibt keinerlei biologische Risiken, die dadurch entstehen, dass man sich einem starken externen magnetischen Feld aussetzt.

Um das Liegen so bequem wie möglich zu gestalten, bekommst Du für die Untersuchung entsprechende Kissen.

Vertraulichkeit

Die Daten der Untersuchung werden selbstverständlich vertraulich und anonym behandelt und nur für wissenschaftliche Zwecke ausgewertet.

Welche Informationen erhalte ich über die Studie?

Es besteht die Möglichkeit, dass während der strukturellen Messung etwas im Gehirn entdeckt wird, wie z.B. ein Tumor oder eine Zyste. Solch ein Zufallsbefund erfordert möglicherweise zusätzliche Untersuchungen oder sogar eine Behandlung. Die Aufnahmen bei dieser Studie werden nur für wissenschaftliche Zwecke genutzt und werden nicht von einem Spezialisten untersucht, der medizinische Diagnosen über die Aufnahme machen kann. Sollte es einen Zufallsbefund geben, müsstest Du einen unabhängigen Arzt aufsuchen und eine genauere Analyse vornehmen lassen.

Falls Du die Möglichkeit eines Zufallsbefundes für Dich nicht in Kauf nehmen willst, solltest Du die Teilnahme an der Studie ablehnen.

Anhang IV.: Information über die Studie (Teil 3)

Absage der Teilnahme

Die Teilnahme an der Studie ist absolut freiwillig. Du kannst die Untersuchung auch jederzeit abbrechen, ohne dass für Dich irgendwelche Konsequenzen entstehen.

Vergütung für die Teilnahme

Für eure Teilnahme bekommt ihr 15 € und auf Wunsch eine CD oder einen Ausdruck mit Bildern von eurem Gehirn.



Ort der Untersuchung: Alfred-Bozi Str. 3

Kontaktinformation

Sören Krach
 Universität Bielefeld
 Abteilung für Psychologie
 AE Klinische Psychologie/Neuropsychologie
 Universitätsstrasse 25
 33615 Bielefeld
 Raum: S4-137
soerenkrach@web.de
 Tel. privat: 0521-5218298
 Tel. Uni: 0521-1063099
 Tel. Kernspin : 96453812 (nur Samstags !)

Einverständniserklärung „fMRI-Studie“

Hiermit bestätige ich, dass ich die Versuchsbedingungen und Sicherheitsvorkehrungen sorgfältig gelesen habe. Alle meine Fragen wurden beantwortet. Ich erkläre mich mit den Versuchsbedingungen einverstanden.

Bielefeld, den _____ Datum, Unterschrift

Anhang V.: Fragebogen zur Erfassung biographischer Daten

Hallo!

Schön, dass Du Dir Zeit für dieses wissenschaftliche Experiment genommen hast. Aufgabe ist es gleich, vier verschiedene sprachliche Aufgaben zu bearbeiten.

Bevor Du an dem Experiment teilnehmen wirst, habe ich noch ein paar Fragen an Dich. Selbstverständlich werden die Daten vertraulich behandelt und anonym gehalten.

•Geschlecht: weiblich männlich

•Alter: _____ Jahre

•Hast Du einen Gymnasial- oder Realschulabschluss?

Ja Nein

•Lag bei Dir in der Vergangenheit schon einmal eine neurologische Erkrankung oder Kopfverletzung vor?

Ja Nein

•Hattest Du in der Kindheit eine verzögerte oder gestörte Sprachentwicklung?

Ja Nein

Anhang VI.: Instruktionen für die Wortgenerierungsaufgabe der fMRT-Studie

Instruktionen für die Wortgenerierungsaufgabe

In der Bedingung „WÖRTER MIT GLEICHEM ANFANGSBUCHSTABEN FINDEN“ erscheint 3 s nach dieser Instruktion ein Wort auf dem Bildschirm, dessen erster Buchstabe **rot** gefärbt ist. Du sollst beim Erscheinen des Wortes damit anfangen, gedanklich so viele Wörter* wie möglich zu finden, die mit dem gleichen Anfangsbuchstaben beginnen. Dabei drück bitte bei jedem Wort, das Dir einfällt, mit beiden Händen die Antworttasten. Diese Wortfindungsaufgabe endet nach 15 s. Das Ende der Aufgabe erkennst Du daran, dass sich der Bildschirm/Plexiglasscheibe für 500 ms rot färbt.

Darauf folgt eine Ruhepause von 8 s, in denen Du Dich entspannen kannst und nicht versuchen sollst, weitere Wörter zu finden. Nach diesen 8 s erscheint eine neue Instruktion, die für 4 s auf dem Plexiglasbildschirm zu lesen ist.

*Wörter: wenn z.B. Wörter mit dem Anfangsbuchstaben „T“ wie z.B. bei „TOSE“ zu generieren wären, dann könntest Du die Wörter „Tafel“, „Tier“, „tragen“ oder „Teheran“ nehmen.

Bitte vermeide es, immer den gleichen Wortstamm zu nutzen, wie z.B. Tortenheber, Tortenguss, Tortenbäcker etc..

Wenn Du noch Fragen hast, wende Dich doch bitte vor dem Beginn des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment solltest Du so ruhig wie möglich liegen und insbesondere den Kopf nicht bewegen. Bitte sprich auch nicht während des Experiments und versuch die Lippen beim mentalen Wort- oder Reimsuchen so wenig wie möglich zu bewegen, da die Registrierung im Kernspintomographen sehr sensibel auf Bewegungen reagiert.

Der erste Buchstabe ist **rot** gefärbt, um die Bedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten und sollte Dich daher nicht beeinträchtigen.

Hast Du noch Fragen?

Anhang VII.: Instruktionen für die Reimgenerierungsaufgabe der fMRT-Studie

Instruktionen für die Reimgenerierungsaufgabe

In der Bedingung „REIMENDE WÖRTER FINDEN“ erscheint 3 s nach dieser Instruktion ein Pseudowort auf dem Bildschirm, dessen erster Buchstabe **rot** gefärbt ist. Du sollst beim Erscheinen des Wortes damit anfangen, gedanklich so viele reguläre deutsche Wörter wie möglich zu finden, die sich auf das vorgegebene Pseudowort reimen. Dabei drück bitte bei jedem Wort, das Dir einfällt, mit beiden Händen die Antworttasten. Diese Reimaufgabe endet nach 15 s. Das Ende der Aufgabe erkennst Du daran, dass sich der Bildschirm/Plexiglasscheibe für 500 ms rot färbt.*

Darauf folgt eine Ruhepause von 8 s, in denen Du Dich entspannen kannst und nicht versuchen sollst, weitere Reimwörter zu finden. Nach diesen 8 s erscheint eine neue Instruktion, die für 4 s auf dem Plexiglasbildschirm zu lesen ist.

*Pseudowörter: nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbare Nichtwörter wie z.B.: „**P**OON“, mögliche richtige Reimwörter: „Sohn“, „schon“, „Klon“, „Hohn“....

Bitte keines der Pseudowörter Englisch oder Französisch aussprechen!! In diesem Fall wäre es falsch, Wörter wie „tun“ oder „Huhn“ auf „**P**OON“ zu generieren!!

Wichtig!: es dürfen alle Wörter, in allen Konjugationen und Schreibweisen, als Reime genommen werden!

Wenn Du noch Fragen hast, wende Dich doch bitte vor dem Beginn des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment solltest Du so ruhig wie möglich liegen und insbesondere den Kopf nicht bewegen. Bitte sprich auch nicht während des Experiments und versuch die Lippen beim mentalen Wort- oder Reimsuchen so wenig wie möglich zu bewegen, da die Registrierung im Kernspintomographen sehr sensibel auf Bewegungen reagiert.

*Der erste Buchstabe ist **rot** gefärbt, um die Bedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten und sollte Dich daher nicht beeinträchtigen.*

Hast Du noch Fragen?

Anhang VIII.: Instruktionen für die Wortentscheidungsaufgabe der fMRT-Studie

Instruktionen für die Wortentscheidungsaufgabe

In der Bedingung „BEI WORT TASTEN DRÜCKEN“ erscheint 3 s nach dieser Instruktion ein Wort oder ein Pseudowort auf dem Bildschirm, dessen erster Buchstabe **rot** gefärbt ist. Du sollst beim Erscheinen des Wortes entscheiden, ob es sich bei diesem Wort um ein richtiges reguläres deutsches Wort handelt oder nicht! Innerhalb von 15 s erscheinen nacheinander in einem Abstand von 3 s fünf solcher Wörter bzw. Pseudowörter, bei denen Du jeweils eine Entscheidung treffen sollst, ob es sich um ein reguläres oder um ein Pseudowort handelt. Dabei drück bitte jedes Mal mit beiden Händen die Antworttasten, wenn es sich um ein reguläres Wort handelt. Diese Wortentscheidungsaufgabe endet nach 15 s. Das Ende der Aufgabe erkennst Du daran, dass sich der Bildschirm/Plexiglasscheibe für 500 ms rot färbt.*

Darauf folgt eine Ruhepause von 8 s, in denen Du Dich entspannen kannst und versuchen sollst, nicht weiter über die Wörter nachzudenken. Nach diesen 8 s erscheint eine neue Instruktion, die für 4 s auf dem Plexiglasbildschirm zu lesen ist.

*Pseudowörter: nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbare Nichtwörter!

Zum Beispiel könnten die Wörter „**K**ARO“, „**O**BER“, „**L**OME“, „**F**LOR“ und „**W**EUT“ innerhalb der 15 s erscheinen. Bei den in diesem Beispiel *kursiv* gedruckten Wörtern, hätte es sich um richtige reguläre deutsche Wörter gehandelt und Du hättest die Tasten drücken müssen!

Wichtig: Du sollst nur deutsche Wörter erkennen und nicht überlegen, ob es sich bei einem Pseudowort vielleicht um ein reguläres Wort in einer Fremdsprache handelt!

Wenn Du noch Fragen hast, wende Dich doch bitte vor dem Beginn des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment solltest Du so ruhig wie möglich liegen und insbesondere den Kopf nicht bewegen. Bitte sprich auch nicht während des Experiments und versuch die Lippen beim mentalen Wort- oder Reimsuchen so wenig wie möglich zu bewegen, da die Registrierung im Kernspintomographen sehr sensibel auf Bewegungen reagiert.

*Der erste Buchstabe ist **rot** gefärbt, um die Bedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten und sollte Dich daher nicht beeinträchtigen.*

Hast Du noch Fragen?

Anhang IX.: Instruktionen für die Reimentscheidungsaufgabe der fMRT-Studie

Instruktionen für die Reimentscheidungsaufgabe

In der Bedingung „BEI REIM TASTEN DRÜCKEN“ erscheinen 3 s nach dieser Instruktion zwei Pseudowörter auf dem Bildschirm, deren erste Buchstaben **rot** gefärbt sind. Du sollst beim Erscheinen des Pseudowortpaares entscheiden, ob sich die beiden Pseudowörter reimen oder nicht. Innerhalb von 15 s erscheinen nacheinander in einem Abstand von 3 s fünf solcher Pseudowortpaare, bei denen Du jeweils eine Entscheidung treffen sollst, ob sie sich reimen oder nicht. Dabei drück bitte jedes Mal mit beiden Händen die Antworttasten, wenn sich Deiner Meinung nach die beiden Pseudowörter reimen. Diese Reimentscheidungsaufgabe endet nach 15 s. Das Ende der Aufgabe erkennst Du daran, dass sich der Bildschirm/Plexiglasscheibe für 500 ms rot färbt.*

Darauf folgt eine Ruhepause von 8 s, in denen Du Dich entspannen kannst und versuchen sollst, nicht weiter über die Wörter nachzudenken. Nach diesen 8 s erscheint eine neue Instruktion, die für 4 s auf dem Plexiglasbildschirm zu lesen ist.

*Pseudowörter: nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbare Nichtwörter; Beispiel für ein reimendes Pseudowortpaar: „**P**OON“ und „**N**OHN“; Beispiel für ein nicht reimendes Pseudowortpaar: „**G**AIE“ und „**G**EFE“.

Bitte keines der Pseudowörter Englisch oder Französisch aussprechen!!
„**M**OVE“ und „**T**UHF“ würden sich nicht reimen!!!

Wenn Du noch Fragen hast, wende Dich doch bitte vor dem Beginn des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment solltest Du so ruhig wie möglich liegen und insbesondere den Kopf nicht bewegen. Bitte sprich auch nicht während des Experiments und versuch die Lippen beim mentalen Wort- oder Reimsuchen so wenig wie möglich zu bewegen, da die Registrierung im Kernspintomographen sehr sensibel auf Bewegungen reagiert.

*Der erste Buchstabe ist **rot** gefärbt, um die Bedingungen so ähnlich wie möglich zu gestalten und sollte Dich daher nicht beeinträchtigen.*

Hast Du noch Fragen?

Anhang X.: Handzettel zur Dokumentation der Leistung während der fMRT-Untersuchung

Name: ___ **VP-Nummer:** ___ **Datum:** ___ **Besonderer Vermerk:** _____

1	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
2	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
3	D						
4	C						
5	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
6	D						
7	C						
8	D						
9	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
10	C						
11	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
12	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
13	D						
14	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
15	C						
16	C						
17	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
18	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
19	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
20	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
21	D						
22	C						
23	D						
24	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
25	C						
26	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
27	D						
28	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
29	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
30	C						
31	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
32	C						
33	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
34	C						
35	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
36	D						
37	D						
38	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
39	D						
40	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
41	C						
42	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
43	C						
44	D						
45	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
46	D						
47	A	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
48	B	/5	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5

Anhang XI.: Stimuli der Wort- und Reimgenerierungsaufgabe der fMRT- Studie (Durchgang siehe Abschnitt 3.1.2.7.)

Reimgenerierung

Durchgang 4	Durchgang 7	Durchgang 10	Durchgang 15	Durchgang 16	Durchgang 22
ZIIH	HÄHR	OITE	WÄLL	TAYS	LAIN
Durchgang 25	Durchgang 30	Durchgang 32	Durchgang 34	Durchgang 41	Durchgang 43
LÄUE	FLUU	AIER	ZANT	LEUA	LADD

Wortgenerierung

Durchgang 3	Durchgang 6	Durchgang 8	Durchgang 13	Durchgang 21	Durchgang 23
BOJE	WAST	LAIB	KIER	RUTE	EIGA
Durchgang 27	Durchgang 36	Durchgang 37	Durchgang 39	Durchgang 44	Durchgang 46
NEYS	DARM	MADE	SOLD	HAFO	ARWE

Anhang XII.: Stimuli der Wort- und Reimentscheidungsaufgabe der fMRT- Studie (Durchgang siehe Abschnitt 3.1.2.7.)

Wortentscheidung

Durchgang 2	Durchgang 9	Durchgang 12	Durchgang 17	Durchgang 19	Durchgang 24
MAST	TAND	TOCH	NAHT	PALT	DASE
DODT	RAKS	WADE	ERUT	MAUG	IMAM
ZOFE	KREI	NEFT	MISA	GALM	DUNG
FUTE	RIFF	MOLE	TROG	GÖRE	UDIE
OGAL	BRUT	POHN	ILIS	ULME	RAST
Durchgang 28	Durchgang 31	Durchgang 35	Durchgang 38	Durchgang 42	Durchgang 47
BLOY	JADE	KOJE	TOGA	SOLE	KAFF
OBBE	EIPE	HOLB	SAUM	REUT	BALE
JOJO	BALG	STÖR	YOGA	REIF	AGOS
NURA	JOCH	JATE	SAUP	FUGE	NERZ
LAVA	GURA	JUTE	ROBA	PLEU	VEIM

Reimentscheidung

Durchgang 1	Durchgang 5	Durchgang 11	Durchgang 14	Durchgang 18	Durchgang 20
KLÄU DREU	SOYU WEUA	JEDU IBUH	MAFA NEVE	LAYN PIEN	BIHN TEYN
PLÄT BERL	RÄXO EKSO	PROI STOY	DOYA HOJA	GLEH PREE	AFAI OREI
OITE LÄUE	TRÄS NEHR	IKSE LEXO	WÄXO AKSU	HAKS GLAX	ROVO UPHE
ZAYN GAIN	TRAI KRIH	KRAY PRAI	OPHE JOFE	WOYE IPHE	ÄUTE EUVA
MOYE WOJE	DAPH JAFF	EGAI ALEU	NIHF WIET	SPOX HOKS	VAYS ZAIS
Durchgang 26	Durchgang 29	Durchgang 33	Durchgang 40	Durchgang 45	Durchgang 48
FOST MALD	LÄUA EUYA	FURA URAH	HOYA FOJO	LIHR GEER	TAIN ZEIN
ZIKS BLAQ	ZIEF KIHR	WAYA NEIA	BIKS FRIX	VOYE ZÄUE	AROY EMÄU
GÄHR REHR	DEUE OYAR	ELÄU VEUE	SIFE IPHE	VRÄH KRET	FOIM ZAIN
BLIE RIIH	PEIT HAYT	IHNE VINI	HOVE OPHA	UKSE RUXE	UREE BERA
NAIS PAYN	MEUE DÄUE	NAKK STEX	JOKS MOCH	GOFE TOVE	KEHR STÄR

Anhang XIII.: Exakte Parameter der fMRT-Studie**1. specify design:****interscan interval:** 3 secs**scans per session:** 480 scans**specify design in scans or seconds:** scans**Hemodynamic basis functions:** HRF**Modell interactions: volterra:** no**Number of conditions:** 4 Bedingungen plus Ruhe**Name of condition 1:** z. B. WE**Vector of onsets (Angabe in Scans):** z. B. 5 25 55 etc.**Durations of Events (scans):** 5 scans je Bedingung, 2.66 scans für Ruhe**Parametric modulation:** none

.

.

.

Other Regressors: 6 (siehe Punkt 2.2.5.2.5.)**2. specify data:****Select SPM.mat****Select Scans for Session 1:** 480 scans (Prefix *swr)**Remove global effects:** none**High pass filter:** specify**Cut off period:** 128 hz**Correct for serial correlations:** AR (1)**Global calculation =** mean Voxel value**Grand mean scaling =** session specific**Global normalization =** none

Anhang XV.: Instruktionen für die Wortgenerierungsaufgabe der fTCD-Studie

Instruktionen für die Wortgenerierungsaufgabe

In diesem Experiment erscheint 5 s nach einem einzelnen Warnton ein Buchstabe auf dem Bildschirm. Sie sollen beim Erscheinen des Buchstabens damit anfangen, gedanklich so viele Wörter wie möglich zu finden, die mit diesem Buchstaben beginnen. Dabei drücken Sie bitte bei jedem Wort, das Ihnen einfällt, mit beiden Zeigefingern auf die Leertaste. Diese Wortfindungsaufgabe endet nach 15 s. Dann hören Sie einen doppelten Ton. Bitte sprechen Sie dann, so viele Ihnen eingefallene Wörter wie möglich, laut aus.*

Es ist nicht schlimm, wenn Sie nicht alle nennen können. Nach 5 s folgt ein dreifacher Ton, dann sollen Sie mit dem Berichten von Wörtern aufhören. Jetzt beginnt eine Ruhepause von 30 s, in denen Sie sich entspannen und nicht versuchen sollen, weitere Wörter zu finden. Nach diesen 30 s erscheint, wieder nach einem Signalton, ein anderer Buchstabe auf dem Bildschirm. Dieser ganze Versuchsablauf beginnt anschließend von Neuem und wird 20 mal wiederholt.

***Wörter:** wenn z.B. Wörter mit dem Anfangsbuchstaben „E“ zu generieren wären, dann könnten Sie die Wörter „Erich“, „Esel“, „es“ oder „eine“ nehmen.

Abgesehen von Q, X und Y werden die Buchstaben (insges. 20 von 23) einmalig und in randomisierter Reihenfolge präsentiert.

Diese Aufgabe dauert ca. 20 Minuten.

Wenn Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich bitte vor dem Ablauf des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment sollen Sie sich ruhig verhalten, d.h. nicht groß bewegen. Wenn es nicht zum Zweck des Experiments gefordert wird, sprechen Sie bitte nicht. Denn die Registrierung der Sonde an Ihrem Kopf ist sehr sensibel.

Haben Sie noch Fragen?

Anhang XVI.: Instruktionen für die Reimgenerierungsaufgabe der fTCD-Studie

Instruktionen für die Reimgenerierungsaufgabe

In diesem Experiment erscheint 5 s nach einem einzelnen Warnton ein „Pseudowort“ auf dem Bildschirm. Sie sollen beim Erscheinen des „Pseudowortes“ damit anfangen, gedanklich so viele Wörter wie möglich zu finden, die sich auf dieses „Pseudowort“ reimen. Dabei drücken Sie bitte bei jedem Wort, das Ihnen einfällt, mit beiden Zeigefingern auf die Leertaste. Diese Reimgenerierungsaufgabe endet nach 15 s. Dann hören Sie einen doppelten Ton. Bitte sprechen Sie dann, so viele Ihnen eingefallene Reimwörter wie möglich, laut aus.*

Es ist nicht schlimm, wenn Sie nicht alle nennen können. Nach 5 s folgt ein dreifacher Ton, dann sollen Sie mit dem Berichten von Wörtern aufhören. Jetzt beginnt eine Ruhepause von 30 s, in denen Sie sich entspannen und nicht versuchen sollen, weitere Wörter zu finden. Nach diesen 30 s erscheint, wieder nach einem Signalton, ein anderes „Pseudowort“ auf dem Bildschirm. Dieser ganze Versuchsablauf beginnt anschließend von Neuem und wird 20 mal wiederholt.

***Pseudowörter:** nach den Regeln der deutschen Sprache aussprechbare Nichtwörter; z.B.: „**MEHT**“, mögliche Reimwörter: „Beet“, „steht“, „geht“....

Wichtig!: es dürfen alle Wörter, in allen Konjugationen und Schreibweisen, als Reime genommen werden!

Diese Aufgabe dauert ca. 20 Minuten.

Wenn Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich bitte vor dem Ablauf des Experiments an den Versuchsleiter. Beim Experiment sollen Sie sich ruhig verhalten, d.h. nicht groß bewegen. Wenn es nicht zum Zweck des Experiments gefordert wird, sprechen Sie bitte nicht. Denn die Registrierung der Sonde an Ihrem Kopf ist sehr sensibel.

Haben Sie noch Fragen?

Anhang XVII.: Beispiel einer ASCII-Datei

Beispiel einer ASCII-Datei

```
FILE: XXX
SAMPLERATE: 28.700 Hz
START TIME: XXX
CHANNEL:
  1   2   3   5
VI Vr ABP CO2 DATA: MCA L MCA R DEPTH 54mm 2 MHz
39.0 44.0 4.0 5.0
43.0 47.0 3.5 4.0
37.0 41.0 4.0 4.0
38.0 42.0 3.5 4.0
58.5 71.0 3.5 4.0
81.0 93.5 3.0 3.0
78.0 91.0 3.5 4.0
68.0 75.5 3.0 4.0
59.0 68.0 4.0 5.0
60.0 61.5 4.5 4.0
45.0 50.0 3.5 4.0
48.0 54.0 3.5 4.0
51.0 58.0 4.0 4.0
50.0 56.0 4.0 4.0
48.5 53.0 4.0 4.0
44.0 49.0 3.5 5.0
42.0 48.0 3.0 4.0
39.0 46.0 4.0 4.0
38.0 41.0 4.0 4.0
38.0 39.0 4.0 4.0
45.5 50.5 4.5 4.0
70.0 82.5 5.0 4.0
82.0 93.0 3.5 4.0
76.5 84.0 3.5 4.0
62.5 71.0 3.0 3.0
58.0 64.0 4.0 4.0
56.0 58.0 3.0 3.0
46.0 51.0 3.0 4.0
50.0 58.0 3.5 4.0
52.0 59.0 4.5 4.0
```

Anhang XVIII.: Wortgenerierung (fMRT-Aktivierungen auf Versuchspersonenebene; Vpn 1-38)

Abkürzungen im folgenden Abschnitt:

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; STG = Superior Temporal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Mid Cing = Middle Cingulum; L = links/left; R = rechts/right; *FWE* = family wise error; Vp = Versuchsperson

Vp 1	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (<i>FWE</i> -corr.)
L Inf F Oper	-64	10	10	325	8.22	0.000	0.000
L Inf F Tri	-62	18	24		7.32	0.000	
L Roland Oper	-54	14	2		6.85	0.000	
R Sup Tem Pole	52	14	-4	75	6.94	0.000	0.000
R Inf F Oper							
R Insula	34	26	2	63	6.67	0.000	0.000
R Inf F Tri							
L Inf F Orb	-50	24	-16	53	6.50	0.000	0.000
L Sup Tem Pole							
L Inf F Orb	-36	30	-8	40	6.44	0.000	0.000
L Insula							
L Inf F Orb	-46	32	-4	26	6.28	0.000	0.000
L MFG	-30	54	32	21	6.03	0.000	0.000

***t* > 4.97 *FWE*, 10 Voxels (*p* = .013)**

Vp 2	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (<i>FWE</i> -corr.)
L Inf F Tri	-58	22	-2	48	7.76	0.000	0.000
L Inf F Orb							
L MFG	-50	4	56	62	7.64	0.000	0.000
L Inf F Orb	-42	26	-4	61	6.24	0.000	0.000
L Insula							
L Inf F Tri							

***t* > 5.06 *FWE*, 10 Voxels (*p* = .008)**

Vp 3	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Precentral	-50	6	32	809	8.77	0.000	0.000
L Inf F Oper	-52	6	48		8.65	0.000	
	-60	12	18		8.54	0.000	
L Insula	-42	20	-2	79	7.46	0.000	0.000
L Inf F Oper							
L MFG	-46	50	10	34	6.85	0.000	0.000
R Precentral	42	4	40	73	6.82	0.000	0.000
L Inf F Tri	-56	38	16	54	6.67	0.000	0.000
L MFG	-50	34	20		6.57	0.000	
L MFG	-52	28	38	12	6.16	0.000	0.000
L Insula	-32	22	8	43	6.04	0.000	0.000
	-34	12	6		6.04	0.000	
R Insula	38	16	-2	14	5.86	0.001	0.000

t > 5.40 FWE, 10 Voxels (*p* = .006)

Vp 4	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Sup Tem Pole	-54	20	-12	100	7.15	0.000	0.000
L Inf F Orb	-46	22	-14		5.65	0.000	
R Sup Tem Pole	52	14	-10	30	6.36	0.000	0.000

t > 5.09 FWE, 10 Voxels (*p* = .005)

Vp 5	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Sup Tem Pole	-58	18	-6	291	9.81	0.000	0.000
L Insula	-46	16	-4		7.98	0.000	
L Inf F Oper							
L Inf F Tri	-62	12	26	263	9.69	0.000	0.000
L Inf F Oper	-60	14	34		9.39	0.000	
L Precentral	-52	22	24		7.75	0.000	
L Inf F Tri	-58	36	6	25	7.82	0.000	0.000
R MF Orb	32	58	-12	41	7.57	0.000	0.000
L MFG	-48	50	10	38	7.12	0.000	0.000
L Insula	-34	20	4	18	6.96	0.000	0.000

L MFG	-32	54	32	26	6.81	0.000	0.000
R Inf F Orb	50	20	-6	30	6.59	0.000	0.000

t > 5.86 FWE, 10 Voxels (*p* = .001)

Vp 6	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Inf F Oper R Precentral	60	12	26	37	7.31	0.000	0.000
L Precentral	-48	4	38	119	7.30	0.000	0.000
L Inf F Oper	-58	16	38		6.06	0.000	
L MFG	-36	42	34	65	6.73	0.000	0.000
	-40	50	28		6.29	0.000	
L Inf F Oper	-52	6	22	25	6.57	0.000	0.000
R MFG	26	42	28	20	5.69	0.002	0.000

t > 5.06 FWE, 10 Voxels (*p* = .005)

Vp 8	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole L Inf F Orb L Inf F Oper	-52	18	-6	47	6.28	0.000	0.000
L Insula	-36	34	6	13	5.53	0.005	0.002

t > 5.05 FWE, 10 Voxels (*p* = .006)

Vp 9	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole	-54	20	-12	100	7.15	0.000	0.000
L Inf F Orb	-46	22	-14		5.65	0.000	
R Sup Tem Pole	52	14	-10	30	6.36	0.000	0.000

t > 5.09 FWE, 10 Voxels (*p* = .005)

Vp 10	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	<u>Level</u> p-Wert (corr.)
R Inf F Oper	58	10	4	276	8.10	0.000	0.000
R Sup Tem Pole	50	12	-8		6.16	0.000	
R Roland Oper							
L Inf F Oper	-64	16	14	202	7.96	0.000	0.000
	-62	16	-4		7.47	0.000	
L Precentral	-44	2	36	81	7.57	0.000	0.000
R Inf F Orb	52	42	-2	83	6.60	0.000	0.000
R Inf F Tri							
R Insula	32	22	4	28	6.53	0.000	0.000
L Mid Cing	-14	20	34	23	6.47	0.000	0.000
L Insula	-38	22	-6	29	6.27	0.000	0.000

t > 5.02 FWE, 10 Voxels (*p* = .010)

Vp 11	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	<u>Level</u> p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-58	8	12	82	5.46	0.007	0.000
L Roland Oper							
R Insula	32	24	8	19	5.16	0.026	0.114
L Inf F Tri	-52	22	26	36	4.74	0.147	0.016
L Inf F Oper							
L Sup Tem Pole	-54	14	-8	38	4.59	0.249	0.013
R Inf F Orb	44	42	-4	15	4.47	0.374	0.191
R Inf F Oper	62	16	18	12	4.35	0.518	0.283
R Inf F Tri							

t > 3.75, 10 Voxels (*p* = .082)

Vp 12	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	<u>Level</u> p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-60	18	-2	156	9.24	0.000	0.000
L MFG	-54	18	46	50	7.16	0.000	0.000
L MFG	-54	36	28	17	6.50	0.000	0.000

L Precentral L Inf F Oper	-40	4	30	42	6.46	0.000	0.000
L Inf F Tri	-58	34	18	12	6.20	0.000	0.000
L Inf F Oper	-48	14	36	10	5.99	0.000	0.000
L MFG L Inf F Tri	-48	36	16	11	5.78	0.001	0.000

$t > 5.36$ FWE, 10 Voxels ($p = .008$)

Vp 13	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Precentral	-60	6	38	23	6.00	0.000	0.000
L Insula L Inf F Orb	-48	20	-6	22	5.47	0.007	0.000

$t > 5.05$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 15	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Insula	34	18	4	75	6.45	0.000	0.000
L STG L Roland Oper	-64	4	4	14	5.96	0.000	0.000

$t > 5.07$ FWE, 10 Voxels ($p = .005$)

Vp 16	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L MF Orb L Inf F Orb	-44	52	-6	166	8.82	0.000	0.000
R Sup Tem Pole R Inf F Orb	52	18	-6	59	8.20	0.000	0.000
L Insula L Inf F Orb L Inf F Tri	-34	32	0	47	8.04	0.000	0.000
R Inf F Tri R MFG	38	34	22	64	7.96	0.000	0.000
L Roland Oper L Inf F Oper	-54	6	10	46	7.58	0.000	0.000

R MF Orb	22	32	-18	14	7.18	0.000	0.000
L Inf F Oper	-60	12	30	39	6.82	0.000	0.000
	-52	16	28		6.58	0.000	
	-58	16	38		6.10	0.000	
R Inf F Oper	56	8	8	17	6.73	0.000	0.000
R Roland Oper							
L Insula	-38	18	2	15	6.62	0.000	0.000

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 17 Aktivierungsort	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster- Level
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	p-Wert (corr.)
L Inf F Orb	-60	16	-6	801	13.27	0.000	0.000
L Insula	-36	28	-10		12.31	0.000	
L Sup Tem Pole	-58	10	8		9.29	0.000	
L Roland Oper							
R Insula	56	16	-6	383	12.10	0.000	0.000
R Sup Tem Pole	44	12	-4		11.14	0.000	
	34	20	-4		7.46	0.000	
L Inf F Tri	-52	32	14	252	10.64	0.000	0.000
L MFG	-52	42	8		6.29	0.000	
R Inf F Orb	34	26	-10	64	9.02	0.000	0.000
L MFG	-48	34	36	57	8.45	0.000	0.000
L MFG	-34	50	26	123	8.34	0.000	0.000
L Precentral	-40	2	42	118	8.01	0.000	0.000
L MFG	-38	2	32		7.49	0.000	
	-46	2	24		7.16	0.000	
L MFG	-44	58	2	78	7.47	0.000	0.000
L MF Orb							
R MFG	30	50	20	23	7.24	0.000	0.000
R Precentral	50	2	48	14	6.74	0.000	0.000
L MFG	-34	20	58	14	6.70	0.000	0.000

$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 18	<u>Koordinaten</u>			<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>	
	Aktivierungsort	x	y	z	Volumen (Voxel)	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Oper	-56	14	0	130	7.87	0.000	0.000
L Sup Tem Pole							
L Inf F Orb							
L Roland Oper							
$t > 5.41$ FWE, 10 Voxels ($p = .003$)							

Vp 19	<u>Koordinaten</u>			<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>	
	Aktivierungsort	x	y	z	Volumen (Voxel)	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Insula	44	12	-6	145	5.06	0.050	0.000
R Inf F Tri	38	12	6		4.96	0.076	
	40	26	-2		4.89	0.099	
L Insula	-34	20	2	24	4.76	0.165	0.041
L MFG	-38	44	8	24	4.62	0.273	0.041
$t > 3.75$, 10 Voxels ($p = .058$)							

Vp 20	<u>Koordinaten</u>			<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>	
	Aktivierungsort	x	y	z	Volumen (Voxel)	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole	-62	6	0	41	7.35	0.000	0.000
L Roland Oper							
R MF Orb	34	52	-10	38	7.05	0.000	0.000
R Inf F Orb							
L MFG	-34	42	44	27	6.91	0.000	0.000
R Insula	38	18	-6	81	6.83	0.000	0.000
R Inf F Orb							
L Insula	-34	20	2	64	6.83	0.000	0.000
L Inf F Orb	-54	24	-8	64	6.47	0.000	0.000
L Insula	-46	20	-10		6.26	0.000	
L Sup Tem Pole							
R Inf F Orb	52	22	-6	26	6.00	0.000	0.000
L Inf F Tri	-40	34	2	11	5.47	0.007	0.000
L Inf F Oper	-54	12	26	12	5.46	0.007	0.000
$t > 5.04$ FWE, 10 Voxels ($p = .007$)							

Vp 21	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole	-64	12	-2	26	6.04	0.000	0.000
L Inf F Oper	-60	20	-6		5.34	0.009	

$t > 4.95$ FWE, 10 Voxels ($p = .030$)

Vp 23	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole	-60	12	-2	166	5.82	0.001	0.001
L Roland Oper							
L Inf F Oper							
L Insula	-36	20	10	33	4.41	0.452	0.574
L Inf F Tri							
L Inf F Oper							

$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .193$)

Vp 24	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-Level</u>
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Oper	-58	18	36	196	5.70	0.002	0.000
L Precentral	-50	12	34		5.44	0.007	
	-62	20	26		4.22	0.696	
R Sup Tem Pole	52	16	-12	28	4.85	0.097	0.629
L Inf F Tri	-40	34	24	69	4.74	0.147	0.055
L MFG							
L MFG	-50	48	4	14	3.92	0.961	0.973
L Inf F Tri							
L Inf F Oper	-48	8	18	31	3.91	0.966	0.540
L Sup Tem Pole	-54	12	-12	10	3.36	1.000	0.996

$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .173$)

Vp 25	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Insula	-36	28	-4	261	9.01	0.000	0.000
L Inf F Orb	-34	22	6		6.69	0.000	
	-52	24	-8		6.50	0.000	
R Insula	46	20	0	341	7.55	0.000	0.000
R Inf F Tri	32	20	8		7.35	0.000	
R Inf F Orb	52	20	-6		7.26	0.000	
L Insula	-42	12	-2	45	7.21	0.000	0.000
L Inf F Tri	-42	28	28	78	7.15	0.000	0.000
	-52	28	22		6.82	0.000	
L Precentral	-46	4	32	25	6.72	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-56	6	0	12	6.08	0.000	0.000
L Roland Oper							
L Precentral	-62	10	32	13	6.03	0.000	0.000

$t > 5.40$ FWE, 10 Voxels ($p = .003$)

Vp 26	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
R Insula	48	12	-4	351	12.04	0.000	0.000
R Inf F Oper	50	6	22		7.43	0.000	
R Sup Tem Pole	54	6	14		6.99	0.000	
L Insula	-58	14	-2	741	11.90	0.000	0.000
L Inf F Oper	-58	20	-12		10.50	0.000	
L Sup Tem Pole	-48	8	-4		9.45	0.000	
L Roland Oper							
L Inf F Oper	-62	8	34	61	7.40	0.000	0.000
L Precentral							
L MFG	-26	44	26	38	7.36	0.000	0.000
L SFG							
R MFG	28	50	34	23	7.18	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-44	24	-32	10	7.17	0.000	0.000
L M Tem Pole							
R Inf F Orb	54	26	-4	13	6.29	0.000	0.000
R Inf F Tri							

$t > 5.84$ FWE, Voxels ($p = .002$)

Vp 28	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-44	16	0	392	5.98	0.000	0.000
L Insula	-52	10	14		5.06	0.047	
	-58	10	20		4.70	0.195	
L Inf F Tri	-42	32	14	106	5.77	0.001	0.005
L MFG							
L MFG	-34	52	24	86	4.85	0.113	0.016
R MFG	34	46	22	136	4.81	0.131	0.001
L Inf F Oper	-50	12	36	78	4.55	0.327	0.026
L Precentral							
R Inf F Oper	62	8	16	49	4.34	0.582	0.166
R Precentral	52	8	22		3.82	0.995	
L Inf F Tri	-56	40	4	76	4.32	0.609	0.029
	-52	36	10		3.38	1.000	
	-46	46	2		3.32	1.000	
L Insula	-32	28	2	26	4.24	0.715	0.681
R Inf F Tri	54	26	8	26	4.08	0.891	0.681
R Insula	40	16	-4	32	3.80	0.997	0.494
R Inf F Orb							

$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .157$)

Vp 30	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Insula	-56	12	2	251	7.00	0.000	0.000
L Roland Oper	-52	12	-8		6.76	0.000	
L Inf F Oper	-42	20	-8		6.65	0.000	
R Inf F Tri	50	16	-6	46	6.45	0.000	0.000
R Inf F Tri	54	22	16	29	6.33	0.000	0.000
R Insula	32	20	0	20	5.81	0.001	0.000

$t > 5.05$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 31	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Insula	-54	18	-8	1008	12.75	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-42	28	0		9.85	0.000	
L Inf F Orb	-42	10	-4		8.40	0.000	

R Sup Tem Pole	54	12	-2	462	11.06	0.000	0.000
R Insula	44	10	-2		8.67	0.000	
R Inf F Orb	50	18	-10		8.66	0.000	
L Inf F Oper	-44	8	30	359	8.40	0.000	0.000
L Precentral	-50	4	42		6.96	0.000	
	-62	12	26		6.86	0.000	
L MFG	-34	52	28	53	7.33	0.000	0.000
L MFG	-42	44	16	35	7.23	0.000	0.000
R MFG	26	52	34	21	6.25	0.000	0.000
R SFG							

$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 32	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Inf F Oper	44	10	-6	425	10.31	0.000	0.000
R Insula	54	14	10		8.91	0.000	
	44	14	10		7.20	0.000	
L Insula	-52	12	-6	424	9.32	0.000	0.000
L Inf F Tri	-44	22	4		9.28	0.000	
	-42	12	-8		8.50	0.000	
R MFG	22	52	30	89	8.52	0.000	0.000
R SFG							
L Roland Oper	-50	0	8	37	8.20	0.000	0.000
L Precentral	-58	4	44	138	7.83	0.000	0.000
L Inf F Oper	-62	14	28		7.82	0.000	
	-64	16	12		6.95	0.000	
R Inf F Oper	58	12	28	35	7.59	0.000	0.000
R Precentral							

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 33	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Insula	-38	14	0	307	8.95	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-52	16	-8		8.19	0.000	
L Inf F Orb	-46	22	-6		7.55	0.000	
R Insula	48	16	-10	112	8.30	0.000	0.000
R Sup Tem Pole	40	10	2		6.97	0.000	
R Inf F Orb							
L Insula	-48	6	0	11	6.54	0.000	0.000

$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 34	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-62	14	8	87	6.83	0.000	0.000
L Inf F Tri	-62	22	10		6.66	0.000	
L Roland Oper							
L MFG	-52	46	12	10	5.92	0.001	0.000

$t > 5.04$ FWE, 10 Voxels ($p = .008$)

Vp 35	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-64	12	26	239	10.88	0.000	0.000
L Precentral							
L Insula	-38	32	-4	1008	9.99	0.000	0.000
L Inf F Tri	-56	20	-2		9.74	0.000	
L Inf F Orb	-50	16	-8		8.67	0.000	
R Insula	44	6	-2	237	9.22	0.000	0.000
R Inf F Oper	40	22	-2		7.42	0.000	
R Inf F Orb							
R Inf F Oper	54	12	12	35	7.71	0.000	0.000
R Precentral	60	4	24	38	7.48	0.000	0.000
L Inf F Oper	-44	14	26	32	6.76	0.000	0.000
L Inf F Tri							

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 36	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
R Precentral	46	6	26	242	9.47	0.000	0.000
R Inf F Tri	58	12	34		7.59	0.000	
L Inf F Tri	-52	30	8	212	8.51	0.000	0.000
L Inf F Orb	-48	30	-8		6.81	0.000	
	-58	26	0		6.77	0.000	
R MFG	48	36	28	131	7.53	0.000	0.000
R Inf F Tri	44	44	22		7.27	0.000	
	38	36	28		6.59	0.000	
R Inf F Oper	62	10	20	36	7.38	0.000	0.000
R Precentral							

R MF Orb	34	58	-2	31	7.25	0.000	0.000
R SFG							
R SF Orb							
R MFG							
R Inf F Tri	52	34	4	21	7.19	0.000	0.000
L Inf Oper	-50	12	36	21	6.53	0.000	0.000
L Precentral							

$t > 5.82$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 37 Aktivierungsort	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster- Level</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	p-Wert (corr.)
R MFG	30	48	30	226	9.26	0.000	0.000
R SFG	38	46	24		7.08	0.000	
L Precentral	-54	10	50	96	8.50	0.000	0.000
L MFG	-50	2	56		6.77	0.000	
	-56	10	36		6.08	0.000	
L Sup Tem Pole	-56	20	-16	185	8.38	0.000	0.000
L Inf F Orb	-62	14	-4		6.88	0.000	
	-46	28	-8		6.44	0.000	
L MFG	-44	52	20	48	7.42	0.000	0.000
	-38	54	26		5.71		
R Sup Tem Pole	56	14	-4	25	6.96	0.000	0.000
R Sup Tem Pole	46	22	-14	42	6.78	0.000	0.000
R Inf F Orb	56	20	-12		5.52		
L Insula	-32	24	8	20	5.58	0.000	0.000
L Inf F Tri							
L Insula	-40	20	-4	26	6.48	0.000	0.000

$t > 5.40$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 38 Aktivierungsart	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Tri	-54	20	18	799	10.16	0.000	0.000
L Inf F Oper	-58	14	-4		9.79	0.000	
L Precentral	-56	8	30		8.95	0.000	
L Sup Tem Pole							
L Insula							
R Inf F Tri	56	32	20	75	8.49	0.000	0.000
L Inf F Tri	-50	40	0	13	6.76	0.000	0.000
L Inf F Orb	-44	50	-6	11	6.40	0.000	0.000
L MFG							

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .0004$)

Anhang XIX.: Reimgenerierung (fMRT-Aktivierungen auf Versuchspersonenebene; Vpn 1-38)

Abkürzungen im folgenden Abschnitt:

Inf F Tri = Inferior Frontal Triangular; Inf F Orb = Inferior Frontal Orbital; Inf F Oper = Inferior Frontal Opercular; Sup Tem Pole = Superior Temporal Pole; MFG = Middle Frontal Gyrus; SFG = Superior Frontal Gyrus; STG = Superior Temporal Gyrus; Roland Oper = Rolandic Opercular; MF Orb = Middle Frontal Orbital; SF Orb = Superior Frontal Orbital; Mid Cing = Middle Cingulum; L = links/left; R = rechts/right; *FWE* = family wise error; Vp = Versuchsperson

Vp 1	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (<i>FWE</i> -corr.)
L Inf F Oper	-66	12	12	37	6.62	0.000	0.000
L Roland Oper							
L Inf F Oper	-54	16	0	38	6.62	0.000	0.000
R Insula	34	24	0	33	6.48	0.000	0.000
R Inf F Tri	48	28	22	31	5.63	0.002	0.000
L Inf F Orb	-34	30	-8	10	5.38	0.008	0.001
<i>t</i> > 4.97 <i>FWE</i>, 10 Voxels (<i>p</i> = .013)							

Vp 2	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-Level
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (<i>FWE</i> -corr.)
L Inf F Orb	-58	22	-4	450	10.13	0.000	0.000
L Inf F Tri	-46	28	-4		8.50	0.000	
L Insula	-36	22	4		5.87	0.001	
R Inf F Orb	46	20	-10	114	7.69	0.000	0.000
R Sup Tem Pole							
L MFG	-50	8	54	51	7.30	0.000	0.000
L MFG	-26	50	24	23	6.89	0.000	0.000
L SFG							
R MFG	40	36	34	25	6.51	0.000	0.000
<i>t</i> > 5.06 <i>FWE</i>, 10 Voxels (<i>p</i> = .008)							

Vp 3	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE- corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Precentral	-60	12	16	619	8.54	0.000	0.000
L Inf F Oper	-50	4	44		7.42	0.000	
	-52	8	30		7.39	0.000	
L Inf F Tri	-54	40	16	82	7.15	0.000	0.000
L MFG	-50	32	22		6.66	0.000	
L Insula	-42	20	-4	40	6.74	0.000	0.000
L MFG	-44	48	8	36	6.73	0.000	0.000
R Precentral	38	4	40	14	5.81	0.001	0.000

$t > 5.40$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 4	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Orb	-54	22	-12	394	9.12	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-46	24	-14		7.91	0.000	
	-38	28	-10		6.73	0.000	
L Inf F Oper	-52	10	16	119	6.52	0.000	0.000
	-50	6	28		5.58	0.004	
	-46	12	32		5.46	0.009	
L Inf F Tri	-50	44	4	20	6.28	0.000	0.000
L MFG							
L MFG	-44	36	26	31	6.11	0.000	0.000
L Inf F Tri	-44	44	32		5.96	0.001	
R Sup Tem Pole	50	16	-6	49	5.93	0.001	0.000
	48	18	-16		5.51	0.007	
R Inf F Oper	54	6	12	13	5.76	0.002	0.000
R MFG	42	42	32	12	5.75	0.002	0.000
L MFG	-34	54	24	28	5.74	0.002	0.000

$t > 5.09$ FWE, 10 Voxels ($p = .005$)

Vp 5	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Insula	-58	18	-6	598	10.16	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-34	20	4		9.88	0.000	
L Inf F Oper	-46	16	-4		9.71	0.000	
L Inf F Tri	-62	14	28	273	9.71	0.000	0.000
L Inf F Oper	-50	22	26		7.88	0.000	
	-38	24	24		6.98	0.000	
R MF Orb	32	58	-10	72	8.71	0.000	0.000
R Inf F Orb	50	20	-8	172	8.46	0.000	0.000
R Insula	40	18	-8		8.04	0.000	
	34	22	0		6.68	0.000	
R MFG	30	54	18	99	8.00	0.000	0.000
	32	52	26		7.06	0.000	
L MFG	-32	52	32	54	7.68	0.000	0.000
L MFG	-50	50	4	87	7.58	0.000	0.000
L Inf F Tri	-56	36	6		7.51	0.000	
R MFG	44	32	36	25	7.21	0.000	0.000
R Inf F Tri	44	46	6	44	7.20	0.000	0.000
R Inf F Oper	10	30	28	21	7.02	0.000	0.000

t > 5.86 FWE, 10 Voxels (*p* = .001)

Vp 6	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Inf F Oper	58	12	26	63	7.38	0.000	0.000
L Precentral	-50	6	36	86	7.04	0.000	0.000
	-56	8	42		6.21	0.000	
L Inf F Oper	-52	6	22	25	6.71	0.000	0.000
R MFG	30	46	34	112	6.66	0.000	0.000
R SFG	18	50	28		6.18	0.000	
L Inf F Orb	-52	20	-12	44	6.64	0.000	0.000
L MFG	-38	50	26	15	6.21	0.000	0.000
R MFG	52	12	40	17	5.56	0.004	0.000
R Precentral							
L Inf F Tri	-52	38	16	10	5.42	0.009	0.000
L MFG							

t > 5.06 FWE, 10 Voxels (*p* = .005)

Vp 8	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>z</u>		<u>t-</u>	<u>p-Wert</u>	<u>Level</u>
Aktivierungsort	x	y	z	Volumen (Voxel)	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	p-Wert (corr.)
L Inf F Oper L Sup Tem Pole L Inf F Orb	-50	14	-2	154	7.74	0.000	0.000
L Insula	-32	32	8	71	7.36	0.000	0.000
L Inf F Orb L MF Orb	-48	46	-8	22	6.13	0.000	0.000
R Inf F Orb	52	18	-6	26	6.07	0.000	0.000

$t > 5.05$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 9	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	<u>x</u>	<u>y</u>	<u>z</u>		<u>t-</u>	<u>p-Wert</u>	<u>Level</u>
Aktivierungsort	x	y	z	Volumen (Voxel)	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	p-Wert (corr.)
L Inf F Orb L Sup Tem Pole	-54	22	-12	394	9.12	0.000	0.000
	-46	24	-14		7.91	0.000	
	-38	28	-10		6.73	0.000	
L Inf F Oper	-52	10	16	119	6.52	0.000	0.000
	-50	6	28		5.58	0.004	
	-46	12	32		5.46	0.009	
L Inf F Tri L MFG	-50	44	4	20	6.28	0.000	0.000
L MFG	-44	36	26	31	6.11	0.000	0.000
L Inf F Tri	-44	44	32		5.96	0.001	
R Sup Tem Pole	50	16	-6	49	5.93	0.001	0.000
R Inf F Tri	48	18	-16		5.51	0.007	
R Inf F Oper R Roland Oper R Precentral	54	6	12	13	5.76	0.002	0.000
R MFG	42	42	32	12	5.75	0.002	0.000
L MFG	-34	54	24	28	5.74	0.002	0.000

$t > 5.09$ FWE, 10 Voxels ($p = .005$)

Vp 10	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Precentral	-46	2	36	303	9.88	0.000	0.000
L Inf F Oper	-58	4	44		7.18	0.000	
L Inf F Oper	-60	14	18	266	9.31	0.000	0.000
L Precentral							
R Precentral	60	4	36	181	7.67	0.000	0.000
	52	6	26		7.47	0.000	
L Insula	-32	20	4	93	7.34	0.000	0.000
	-38	22	-6		6.63	0.000	
L MFG	-40	40	8	38	7.10	0.000	0.000
R Inf F Oper	50	10	10	174	6.90	0.000	0.000
R Roland Oper	58	8	2		6.52	0.000	
R Sup Tem Pole	48	10	-6		5.60	0.003	
R Insula	32	22	4	34	6.44	0.000	0.000
L SFG	-28	4	70	15	6.43	0.000	0.000
L MFG	-32	4	54	54	6.17	0.000	0.000
	-28	2	46		5.93	0.001	
L Sup Tem Pole	-60	16	-4	32	6.07	0.000	0.000
	-58	16	-14		5.13	0.031	

$t > 5.02$ FWE, 10 Voxels ($p = .010$)

Vp 11	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Oper	-60	8	10	512	8.07	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-54	12	-6		7.68	0.000	
L Roland Oper	-64	20	8		5.76	0.001	
R Inf F Orb	46	42	-8	601	7.67	0.000	0.000
R Inf F Tri	48	12	-8		7.11	0.000	
R Inf F Oper	54	12	4		6.30	0.000	
R Sup Tem Pole							
L Insula	-32	30	6	22	6.08	0.000	0.000
L Inf F Oper	-60	22	32	56	5.87	0.001	0.000
L Inf F Tri	-52	22	28		5.55	0.004	
R MFG	38	46	16	22	5.73	0.002	0.000
R Insula	32	22	8	15	5.61	0.003	0.000
L Inf F Orb	-54	32	-4	23	5.45	0.007	0.000

$t > 5.01$ FWE, 10 Voxels ($p = .011$)

Vp 12	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Tri	-62	16	6	422	10.14	0.000	0.000
L Inf F Oper	-60	18	-2		9.49	0.000	
	-56	34	26		7.88	0.000	
L Inf F Oper	-54	18	44	245	7.83	0.000	0.000
L Precentral	-48	14	36		7.55	0.000	
L MFG	-42	4	30		7.54	0.000	
L Sup Tem Pole	-48	24	-4	97	7.77	0.000	0.000
L Inf F Orb	-42	24	-4		6.24	0.000	
L Insula							
R Inf F Orb	54	22	-10	63	7.04	0.000	0.000
	50	18	-4		6.71	0.000	

$t > 5.36$ FWE, 10 Voxels ($p = .008$)

Vp 13	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
R Insula	44	18	-4	132	7.46	0.000	0.000
R Inf F Orb	56	12	-2		6.50	0.000	
R Inf F Tri							
L MFG	-32	58	26	22	6.67	0.000	0.000
L Precentral	-62	6	38	17	6.36	0.000	0.000
R Precentral	58	2	40	16	5.99	0.000	0.000
L Inf F Orb	-50	20	-6	24	5.78	0.001	0.000
L Insula							

$t > 5.05$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 15	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
R Sup Tem Pole	58	8	0	123	8.70	0.000	0.000
R Roland Oper							
R Inf F Oper							
R MFG	34	44	28	83	7.37	0.000	0.000
R Insula	32	20	6	143	7.22	0.000	0.000
R Inf F Orb	44	18	-10		6.69	0.000	
L STG	-64	2	4	27	6.48	0.000	0.000
L Roland Oper							
L Insula	-36	18	4	40	6.31	0.000	0.000

R Inf F Oper	50	14	16	16	6.01	0.000	0.000
R Inf F Orb	52	30	-4	10	5.82	0.001	0.000

$t > 5.07$ FWE, 10 Voxels ($p = .005$)

Vp 16	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Oper	-58	12	30	399	10.57	0.000	0.000
L Precentral	-56	6	46		6.92	0.000	
	-48	8	40		6.68	0.000	
L MF Orb	-46	48	-6	252	9.98	0.000	0.000
L Inf F Tri							
L Inf F Orb							
R Sup Tem Pole	54	16	-6	197	9.80	0.000	0.000
R Insula	40	14	2		7.08	0.000	
R Inf F Orb	56	12	2		6.73	0.000	
L Inf F Orb	-52	22	-10	277	9.67	0.000	0.000
L Roland Oper	-54	8	8		9.47	0.000	
L MFG	-40	40	38	31	8.54	0.000	0.000
R Inf F Tri	38	32	22	124	7.92	0.000	0.000
R MFG	48	40	26		7.88	0.000	
L Insula	-32	30	0	29	7.49	0.000	0.000
R MFG	32	54	20	22	6.97	0.000	0.000
L MF Orb	24	34	-18	18	6.82	0.000	0.000
L Inf F Oper	-62	16	18	14	6.67	0.000	0.000

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 17	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Orb	-36	28	-8	520	11.14	0.000	0.000
L Insula	-60	16	-6		10.63	0.000	
L Inf F Oper	-46	22	-8		8.16	0.000	
L Sup Tem Pole							
R Sup Tem Pole	56	16	-4	276	10.98	0.000	0.000
R Insula	44	14	-4		9.23	0.000	
R Inf F Orb							
R Inf F Orb	34	26	-10	89	9.50	0.000	0.000
R Insula							
L MFG	-28	52	30	53	7.07	0.000	0.000

R MFG	30	54	22	24	6.63	0.000	0.000
R SFG							
$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)							

Vp 18	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
Aktivierungsort							
L Inf F Oper	-56	14	0	120	7.36	0.000	0.000
L Sup Tem Pole							
L Roland Oper							
L Insula	-28	28	2	21	6.77	0.000	0.000
$t > 5.41$ FWE, 10 Voxels ($p = .003$)							

Vp 19	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
Aktivierungsort							
R Insula	44	14	-4	507	7.46	0.000	0.000
R Inf F Oper	56	18	2		6.67	0.000	
R Inf F Tri	38	28	0		5.87	0.001	
R Inf F Orb							
L Precentral	-62	10	24	51	5.17	0.031	0.001
L Inf F Oper							
L Inf F Tri	-44	34	14	92	5.16	0.032	0.000
L MFG	-40	42	10		4.32	0.634	
L Insula	-32	20	4	37	4.80	0.139	0.007
R MFG	38	52	4	21	4.59	0.302	0.062
	38	50	12		3.92	0.980	
L Insula	-40	4	0	10	4.47	0.433	0.326
$t > 3.75$, 10 Voxels ($p = .058$)							

Vp 20	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Orb L Sup Tem Pole	-54	24	-10	120	8.59	0.000	0.000
L Sup Tem Pole L STG	-62	6	0	141	8.21	0.000	0.000
L Inf F Oper L Precentral L Postcentral	-66	0	20	586	8.14	0.000	0.000
L MFG	-32	44	42	59	7.66	0.000	0.000
R Sup Tem Pole R Inf F Orb R Insula	52	14	-8	315	7.36	0.000	0.000
R Postcentral R Precentral R Inf F Oper	48	22	-12		7.27	0.000	
L Inf F Tri	-38	32	0	51	6.44	0.000	0.000
R MFG	-50	34	4		5.52	0.005	
L Insula	36	42	36	11	5.89	0.001	0.000
	-32	20	2	12	5.58	0.004	0.000

$t > 5.04$ FWE, 10 Voxels ($p = .007$)

Vp 21	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Inf F Orb L Inf F Tri L Inf F Oper L Sup Tem Pole	-56	36	-4	186	7.59	0.000	0.000
L MFG	-62	12	2		7.10	0.000	
R SF Orb R MF Orb	-60	22	-6		6.30	0.000	
	-36	46	36	24	6.32	0.000	0.000
	22	56	-8	10	5.71	0.002	0.002

$t > 4.95$ FWE, 10 Voxels ($p = .030$)

Vp 23	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Sup Tem Pole	-62	12	-2	180	7.46	0.000	0.000
L Roland Oper	-54	8	6		4.82	0.111	
L Inf F Oper							
L Insula	-38	20	8	49	5.62	0.003	0.247
L Inf F Tri							
L Inf F Oper							
R Sup Tem Pole	56	16	-4	65	5.35	0.011	0.101
R Inf F Tri	46	26	4	55	4.87	0.090	0.176
L Precentral	-58	4	44	14	4.23	0.685	0.985
$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .193$)							

Vp 24	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L MF Orb	-34	64	-6	92	6.17	0.000	0.015
L SF Orb							
L Inf F Oper	-58	18	36	218	4.78	0.129	0.000
L Inf F Tri	-56	16	28		4.30	0.580	
	-46	10	34		4.25	0.645	
L MFG	-52	32	36	28	4.53	0.309	0.629
L Inf F Tri	-50	48	0	48	4.31	0.575	0.197
L MFG	-46	40	0		3.62	1.000	
	-38	38	-2		3.45	1.000	
R Inf F Tri	48	46	14	14	4.27	0.627	0.973
L Sup Tem Pole	-52	20	-8	89	4.25	0.655	0.017
L Inf F Orb	-56	12	-8		3.88	0.975	
L Inf F Tri	-50	30	26	67	4.12	0.810	0.061
L MFG	-40	34	26		4.02	0.902	
R MF Orb	40	56	-12	14	4.11	0.819	0.973
L Roland Oper	-48	4	16	22	3.48	1.000	0.811
	-50	4	8		3.47	1.000	
$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .173$)							

Vp 25	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Precentral	-58	4	44	158	7.97	0.000	0.000
L MFG	-50	2	56		7.19	0.000	
	-58	-4	46		6.74	0.000	
L Inf F Tri	-44	28	26	58	7.65	0.000	0.000
L Inf F Orb	-38	28	-8	40	7.36	0.000	0.000
L Insula							
L Inf F Oper	-54	14	22	25	6.71	0.000	0.000
L Inf F Tri							
L Precentral	-48	6	32	55	6.62	0.000	0.000
L Inf F Oper	-42	10	26		5.76	0.001	
L Inf F Orb	-52	26	-8	16	6.31	0.000	0.000
R Inf F Tri	48	22	0	39	6.30	0.000	0.000
R Inf F Orb							

$t > 5.40$ FWE, 10 Voxels ($p = .003$)

Vp 26	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
R Inf F Oper	50	14	-4	502	12.10	0.000	0.000
R Insula	50	6	22		9.79	0.000	
R Sup Tem Pole							
R Precentral							
L Insula	-60	16	-2	529	10.14	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-56	20	-12		9.54	0.000	
L Inf F Oper	-48	16	-8		9.10	0.000	
L Inf F Orb							
L MFG	-26	44	28	38	8.22	0.000	0.000
L SFG							
R MFG	26	50	34	37	7.53	0.000	0.000
L Precentral	-62	14	30	33	6.83	0.000	0.000
L Inf F Oper	-62	6	36		6.62	0.000	
R MFG	20	40	28	10	6.57	0.000	0.000
R SFG							

$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 28	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Inf F Tri	-56	34	14	263	5.07	0.046	0.000
L Inf F Oper	-50	20	8		4.56	0.315	
	-62	10	18		4.48	0.403	
R Inf F Tri	54	26	6	43	4.71	0.188	0.247
L MFG	-30	50	26	24	4.04	0.923	0.746

$t > 3.11$, 10 Voxels ($p = .157$)

Vp 30	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
L Insula	-52	12	-8	995	10.53	0.000	0.000
L Inf F Orb	-50	22	-12		9.27	0.000	
L Sup Tem Pole	-34	14	4		9.25	0.000	
L Inf F Oper							
R Inf F Tri	34	18	-4	588	9.26	0.000	0.000
R Insula	50	16	-6		8.18	0.000	
R Inf F Orb	52	18	4		7.81	0.000	
L MFG	-32	56	20	157	8.32	0.000	0.000
L SFG	-26	50	12		7.40	0.000	
L Inf F Tri	-40	14	20	128	7.46	0.000	0.000
L Inf F Oper							
L Inf F Tri	-50	42	4	73	6.53	0.000	0.000
L MFG	-44	48	0		6.23	0.000	
R MFG	36	38	24	20	6.33	0.000	0.000
R MFG	28	48	14	27	6.09	0.000	0.000
	36	50	10		5.33	0.014	
R MFG	48	14	46	24	5.80	0.001	0.000
L MFG	-52	14	50	16	5.58	0.004	0.000
	-54	6	50		5.15	0.032	

$t > 5.05$ FWE, 10 Voxels ($p = .006$)

Vp 31	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Insula	-54	20	-10	788	11.55	0.000	0.000
L Sup Tem Pole	-42	28	-2		10.13	0.000	
L Inf F Orb	-44	10	-4		8.37	0.000	
R Sup Tem Pole	50	18	-10	437	10.32	0.000	0.000
R Insula	54	12	-2		9.82	0.000	
R Inf F Orb	40	22	-2		7.26	0.000	
L Inf F Oper	-44	8	30	270	9.02	0.000	0.000
L Precentral	-52	10	32		7.26	0.000	
	-38	16	30		6.27	0.000	
L MFG	-34	52	26	66	8.34	0.000	0.000
R MFG	34	42	36	32	7.85	0.000	0.000
L MFG	-38	40	16	26	7.11	0.000	0.000
R MFG	26	50	30	41	7.01	0.000	0.000
R SFG							
R MFG	38	52	14	20	6.37	0.000	0.000

t > 5.84 FWE, 10 Voxels (*p* = .002)

Vp 32	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	Aktivierungsort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Inf F Oper	50	10	-2	517	10.92	0.000	0.000
R Insula	54	16	14		10.36	0.000	
	60	10	26		8.50	0.000	
L Insula	-42	14	-10	659	9.46	0.000	0.000
L Inf F Oper	-58	4	44		8.50	0.000	
L Precentral	-62	12	36		8.16	0.000	
R SFG	20	56	32	100	8.40	0.000	0.000
R MFG							
R Inf F Tri	50	42	10	45	7.64	0.000	0.000
R MFG	40	36	38	22	7.20	0.000	0.000

t > 5.83 FWE, 10 Voxels (*p* = .001)

Vp 33	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
Aktivierungsort							
L Insula	-38	14	2	138	8.95	0.000	0.000
R Insula	48	16	-8	90	8.20	0.000	0.000
R Sup Tem Pole	42	10	0		6.41	0.000	
R Inf F Orb	52	12	2		6.05	0.000	
L Sup Tem Pole	-58	12	0	149	8.19	0.000	0.000
L Roland Oper	-52	16	-8		7.59	0.000	
L Inf F Orb	-46	22	-6		7.36	0.000	
L Insula							
L Precentral	-56	2	50	17	6.80	0.000	0.000
L Precentral	-48	2	42	10	6.36	0.000	0.000

$t > 5.84$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 34	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
Aktivierungsort							
L Inf F Tri	-62	22	8	37	5.40	0.010	0.000
L Inf F Oper	-62	12	10		4.84	0.114	
L Inf F Tri	-44	32	2	20	5.2	0.023	0.004
L MFG	-52	46	12	11	5.10	0.037	0.022
L MFG	-30	46	32	11	4.98	0.063	0.022

$t > 4.31$, 10 Voxels ($p = .030$)

Vp 35	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster-
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	Level p-Wert (corr.)
Aktivierungsort							
L Insula	-36	32	-4	1206	11.05	0.000	0.000
L Inf F Tri	-56	20	-2		10.47	0.000	
L Inf F Orb	-50	-6	8		10.44	0.000	
L Inf F Oper	-66	12	26	236	10.67	0.000	0.000
L Precentral	-60	18	20		8.44	0.000	
L Inf F Tri							
R Inf F Oper	44	10	2	539	9.95	0.000	0.000
R Insula	56	14	14		8.98	0.000	
R Inf F Tri	40	24	-6		8.92	0.000	
R Inf F Orb							
L Inf F Oper	-44	14	24	74	8.47	0.000	0.000
L Inf F Tri							

R Precentral	62	6	22	34	7.66	0.000	0.000
R MFG	42	44	28	73	7.37	0.000	0.000
L MFG	-38	48	4	34	7.23	0.000	0.000
L MFG	-28	52	20	17	6.71	0.000	0.000

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 36 Aktivierungsort	Koordinaten			Volumen (Voxel)	Voxel-Level		Cluster- Level
	x	y	z		t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)	p-Wert (corr.)
R Precentral	46	6	26	514	11.49	0.000	0.000
R Inf F Oper	62	10	20		8.05	0.000	
R Inf F Tri	44	44	22	424	10.66	0.000	0.000
R MFG	48	36	22		8.55	0.000	
	52	36	6		8.40	0.000	
L Inf F Tri	-52	30	8	367	9.18	0.000	0.000
L Inf F Orb	-50	30	-10		8.69	0.000	
	-58	26	0		7.92	0.000	
L Inf F Oper	-52	12	34	177	8.83	0.000	0.000
L Precentral	-56	14	20		7.19	0.000	
	-62	18	28		6.96	0.000	
L MFG	-48	38	32	72	8.64	0.000	0.000
R MFG	34	60	0	44	8.14	0.000	0.000
R MF Orb							
R SF Orb							
L Precentral	-56	2	50	84	7.88	0.000	0.000
	-58	-10	48		7.60	0.000	
	-46	-2	48		6.26	0.000	
R Inf F Orb	52	24	-4	47	6.93	0.000	0.000
R Inf F Tri	46	26	-12		6.35	0.000	
L MFG	-44	56	8	19	6.67	0.000	0.000
R MF Orb	42	44	-4	14	6.43	0.000	0.000
R Inf F Orb							

$t > 5.82$ FWE, 10 Voxels ($p = .001$)

Vp 37	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	<u>Aktivierungs-</u> sort	x	y		z	t-Wert	p-Wert (FWE-corr.)
R Sup Tem Pole	46	22	-16	298	10.83	0.000	0.000
R Inf F Orb	56	14	-4		7.56	0.000	
	38	18	-4		6.68	0.000	
L Sup Tem Pole	-52	20	-16	614	10.73	0.000	0.000
L Inf F Orb	-46	28	-6		10.68	0.000	
L Insula	-60	14	-4		8.89	0.000	
R MFG	32	48	30	568	10.71	0.000	0.000
R SFG	44	46	8		6.29	0.000	
L MFG	-44	50	18	398	9.47	0.000	0.000
	-32	56	30		8.20	0.000	
	-40	38	12		7.34	0.000	
L Precentral	-54	10	50	173	8.71	0.000	0.000
L Inf F Oper	-52	8	32		7.13	0.000	
L Inf F Tri	-58	12	36		6.98	0.000	
L Inf F Tri	-50	40	4	49	7.59	0.000	0.000
L MFG							
R Inf F Oper	46	4	26	118	7.55	0.000	0.000
R Precentral	54	14	30		7.51	0.000	
R Inf F Tri							
L Insula	-32	24	6	26	7.53	0.000	0.000
R Inf F Orb	32	24	-24	17	7.21	0.000	0.000
R Sup Tem Pole							
R Insula	44	4	4	16	6.23	0.000	0.000

$t > 5.40$ FWE, 10 Voxels ($p = .002$)

Vp 38	<u>Koordinaten</u>			Volumen (Voxel)	<u>Voxel-Level</u>		<u>Cluster-</u>
	<u>Aktivierungs-</u> sort	x	y		z	t- Wert	p-Wert (FWE-corr.)
L Sup Tem Pole	-58	14	-4	282	9.59	0.000	0.000
L Inf F Orb	-40	24	-8		7.91	0.000	
L Insula							
L Inf F Tri	-60	12	30	88	8.28	0.000	0.000
L Inf F Oper	-54	22	18		8.21	0.000	
L Precentral							
R Inf F Orb	42	18	-10	111	7.29	0.000	0.000
R Insula	30	22	-10		6.41	0.000	
	34	20	0		5.99	0.000	

$t > 5.83$ FWE, 10 Voxels ($p = .004$)

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Promotionsarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Bielefeld, 13.03.2006

Sören Krach