

**Kortikale Verarbeitung von bewegungs- und sprachrelevanten visuellen
Stimuli bei Gehörlosen, Gebärdensprachdolmetschern und Hörenden
– eine Untersuchung mit funktioneller Kernspintomografie.**

Dissertation

**zur Erlangung des
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)**



Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg



seit 1548

Friedrich-Schiller-Universität Jena

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg,
Fachbereich Musik-, Sport- und Sprechwissenschaft

von

Ulrike Liebisch

geboren am 17.03.1979 in Jena

urn:nbn:de:gbv:3-000009361

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000009361>]

Gutachter

1. Prof. Dr. phil. habil. Jürgen Leirich

2. PD. Dr. med. / phil. habil. Thomas Weiß

3. Prof. Dr. habil. Siegfried Leuchte

Tag der Verteidigung: 25.11.2005

Für Philipp

„(...) Weiter bringt mich keiner, du mein Rückenwind. (...)“

Heinz Rudolf Kunze

Danksagung

Großer Dank gebührt zu allererst Prof. Dr. Jürgen Leirich, der diese Arbeit geboren hat, ohne dessen unerschütterlichen Glauben in dieses Thema es diese Dissertation nie gegeben hätte und der mir der beste Doktorvater war, den man sich wünschen kann.

Der gleiche Dank gilt PD Dr. Thomas Weiß, der dieses „Kind“ mit unendlicher Geduld und trotz berechtigter Bedenken großgezogen hat. Nur unter seiner geduldigen Betreuung ist es mir als Frischling auf einem vollkommen fremden Gebiet gelungen, Fuß zu fassen. Ohne seine stets konstruktive Hilfe und sein offenes Ohr für Fragen wäre diese Arbeit nicht gelungen.

Bei Prof. Dr. Wolfgang H. R. Miltner bedanke ich mich dafür, dass er einer fremd-anmutenden Sportwissenschaftlerin einen Platz in der Psychologie-Welt gewährt und diese interdisziplinäre Arbeit ermöglicht hat.

Mein größter Dank gilt vor allem den beiden Menschen, die mich fast rund um die Uhr ertragen mussten und durch die ich in den Genuss ihrer täglichen Aufbaumühungen kam. Mit an ein Wunder grenzender unendlicher Geduld haben Philipp Teschner und Dorothee Spohn meinen Sorgen, Ängsten und Zweifeln täglich aktive Sterbehilfe geleistet und mir an so manchen Tagen aus der Krise geholfen. Meinem Verlobten gebührt großer Respekt für seine unermüdlichen Korrekturen und Hilfestellungen. Seine Liebe gibt dieser Arbeit eine Daseinsberechtigung. Ebenso von Bedeutung waren die Lerngruppen mit Dorothee Spohn. Ohne die Beiden hätte ich aufgegeben, wirklich. Danke!!!

Des Weiteren danke ich meinen Jenaer Kollegen. Dr. Thomas Straube für seine Hilfe beim Paradigma und seine kritischen Hinterfragungen, Alexander Mohr für seine geduldigen Mühen, einem statistisch unbeholfenem Menschen diese Kunst beizubringen und für seine mahnenden Worte, dass ein „sozialer Abwärtsvergleich“ auch kein Ausweg sei und Daniela Simon, die mir immer aufmerksam zugehört hat und gerade in den letzten Wochen und im größten Stress konstruktiv geholfen hat.

Bei Holger Hecht bedanke ich mich dafür, dass er mir ausnahmslos und wirklich immer gezeigt hat, wo der „Power-Knopf“ am PC ist und dank dessen unendlicher Geduld mit Frauen und Technik dem Paradigma überhaupt erst Leben eingehaucht wurde.

Ein weiteres Dankeschön gilt dem Radiologischen Team Dr. Böttcher, Dr. Mentzel, Frau Krumbein und Frau Metzinger, die ohne zu Murren zu jeder Tages- und Nachtzeit meine Probanden im Scanner betreut haben und ohne deren Hilfe ein solches Experiment nicht durchführbar gewesen wäre.

Danke auch an Carola Arfeller, die tapfer nächtelang mit mir in die Schlacht gegen den Computer gezogen ist (wir haben gesiegt!), an Astrid Klinge, die mit ihren Augen Buchstabendreher gefunden hat, die mein Gehirn einfach nicht mehr wahrnehmen wollte und Katja Hofmann, deren telefonische Seelsorge-Hotline immer frei geschaltet war.

Last but not least gilt ein großes Dankeschön meinen über fünfzig Testpersonen und Probanden, die tapfer alles über sich haben ergehen lassen, sowie Daniela Kunz und Jens Brauer, die mir tatkräftig bei der Durchführung der Untersuchungen zur Seite standen. Ich zolle vor allem „meinen“ Gehörlosen großen Respekt, bei denen diese Tests nur mit viel Vertrauen durchführbar waren, da ihnen viele Dinge gänzlich unbekannt waren. Danke meinem Freundeskreis sowie der Volleyballmannschaft und meinen Dolmetscherkollegen, die ihre Freizeit ein Stück weit für mich aufgegeben haben. Meinen Eltern gebührt Dank für ihr Vertrauen in mich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie Gehörlosigkeit.....	3
2.1	<i>Definition und Abgrenzung des Begriffes „Gehörlosigkeit“</i>	3
2.2	<i>Epidemiologie der Gehörlosigkeit.....</i>	3
2.3	<i>Physiologische Leitung akustischer Stimuli über die Hörbahn.....</i>	4
2.4	<i>Ätiologie der Gehörlosigkeit</i>	5
2.5	<i>Allgemeines zur Darstellung von Studien und Befunden zu Veränderungen der Hirnfunktionen und -strukturen bei gehörlosen Menschen</i>	7
3	Grundlagen des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis	9
3.1	<i>Sprache bei Hörenden.....</i>	10
3.1.1	<i>Sprachentwicklung bei Hörenden.....</i>	10
3.1.2	<i>Zerebrale Repräsentation von Lautsprache.....</i>	11
3.1.2.1	<i>Verarbeitung sprachlicher Stimuli</i>	11
3.1.2.2	<i>Verarbeitung nicht-sprachlicher Stimuli</i>	11
3.2	<i>Sprache bei Gehörlosen</i>	12
3.2.1	<i>Sprachentwicklung bei Gehörlosen</i>	12
3.2.1.1	<i>Unterschiede zwischen frühem und spätem Spracherwerb bei Gehörlosen.....</i>	13
3.2.1.2	<i>Die Auswirkungen unterschiedlicher Bezugspersonen, von denen die Gebärdensprache gelernt wird.....</i>	14
3.2.2	<i>Zerebrale Repräsentation von Gebärdensprache</i>	14
3.2.2.1	<i>Verarbeitung sprachlicher Stimuli</i>	15
3.2.2.2	<i>Verarbeitung nicht-sprachlicher Stimuli</i>	16
3.3	<i>Besondere Anforderungen durch die Gebärdensprache und Auswirkungen auf die zerebrale Repräsentation dieser Sprachform</i>	17
3.3.1	<i>Primärer auditiver Kortex (= Gyri temporales transversi).....</i>	22
3.3.2	<i>Sekundärer auditiver Kortex (= Gyrus temporalis superior)</i>	23
3.3.3	<i>Broca-Areal (= motorisches Sprachareal).....</i>	23
3.3.4	<i>Gyrus praecentralis (= Motokortex)</i>	24
3.3.5	<i>Ventraler Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis)</i>	25
3.3.6	<i>Dorsaler Pfad (= Teil des Parietallappens)</i>	26
3.4	<i>Neuronale Besonderheiten durch bilingualen Spracherwerb und -gebrauch</i>	29
3.5	<i>Worin besteht der Unterschied zwischen Gebärden und Gesten?.....</i>	31
3.5.1	<i>Einordnung des Begriffes „Gesten“</i>	33
3.5.2	<i>Welche neuronalen Korrelate hängen mit der Verarbeitung von Gesten zusammen?.....</i>	33
4	Hypothesen des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis	35
4.1	<i>Hypothesen zum Wernicke-Areal</i>	35
4.2	<i>Hypothesen zum Broca-Areal.....</i>	37
4.3	<i>Hypothesen zum ventralen Pfad.....</i>	37
4.4	<i>Hypothesen zum Gyrus praecentralis.....</i>	39

5	5 Methode	41
5.1	<i>Physikalische und neurobiologische Grundlagen zum Messverfahren</i>	41
5.1.1	Grundprinzip der Magnet-Resonanz-Tomografie (MRT).....	41
5.1.2	Weiterverarbeitung des MR-Signals.....	44
5.1.3	Echo-Planar-Imaging Methode (EPI).....	45
5.1.4	Grundprinzip der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomografie (fMRT).....	45
5.1.5	Brain Impulse Response.....	47
5.1.6	Kritische Betrachtung des MRT-Verfahrens.....	48
5.2	<i>Stichprobe</i>	49
5.2.1	Vergleich: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1).....	49
5.2.2	Vergleich: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2).....	51
5.3	<i>Materialien für das fMRT-Experiment</i>	52
5.4	<i>Paradigma</i>	55
5.5	<i>Versuchsaufbau</i>	57
5.6	<i>Versuchsablauf</i>	58
5.7	<i>Verarbeitung der fMRT-Daten</i>	61
5.7.1	Darstellung von fMRT-Daten im <i>Talairach-Raum</i>	61
5.7.2	Ablauf der Einzelschritte zur Transformation der Daten.....	63
5.7.2.1	Erstellen von Positionsfiles zur Lagebestimmung des Kopfes.....	63
5.7.2.2	Erstellen einer funktionellen Datei und Anlegen einer Referenzdatei als Ausgangsdatei zur Bearbeitung aller folgenden Volumes.....	63
5.7.2.3	Bewegungskorrektur der funktionellen Volumes zum Ausgleich von Bewegungsartefakten.....	65
5.7.2.4	Zeitliche Korrektur der funktionellen Volumes und Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.....	66
5.7.2.5	Erstellen einer anatomischen Datei zur Zuordnung von Aktivierungen zu anatomischen Strukturen.....	67
5.7.2.6	Verknüpfung und Übereinanderlegung des funktionellen Bildes und des anatomischen Bildes zur genauen Lokalisation von Aktivierungen.....	68
5.7.2.7	Standardisierung der anatomischen Bilder zur Übereinstimmung mit dem Referenzgehirn mittels manueller Korrektur an zehn Referenzpunkten.....	69
5.7.2.8	Verknüpfung des funktionellen Bildes mit dem anatomischen Bild und Erstellen der zeitlichen Reihenfolge aller funktionellen Bilder.....	72
5.7.2.9	Räumliche Glättung der funktionellen Daten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.....	74
5.7.3	Grenzen in der Datenaufbereitung mit <i>Brain Voyager 2000</i>	75
5.7.4	Statistische Weiterverarbeitung der Daten.....	76
5.7.4.1	Random-Effect-Analyse.....	80
5.7.4.2	Fixed-Effect-Analyse.....	81
5.7.5	Hypothesengeleitete Datenverarbeitung.....	82
5.7.5.1	Datenanalyse für das Bilderparadigma.....	83
5.7.5.2	Datenanalyse für das Motorikparadigma.....	84
6	6 Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis	86
6.1	<i>Ergebnisse in Bezug auf das Wernicke-Areal</i>	87
6.1.1	Ergebnisse bezüglich der Hypothese 1.....	87
6.1.2	Tests zu den Lateralisierungsmustern der Aktivierungen.....	94
6.1.2.1	Varianzanalysen mit Messwiederholung.....	94
6.1.2.2	Lateralitätsindex.....	96
6.1.3	Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Wernicke-Areal – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 2.....	97
6.2	<i>Ergebnisse in Bezug auf das Broca-Areal</i>	101
6.2.1	Ergebnisse bezüglich der Hypothese 3.....	101

6.2.2	Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Broca-Areal – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 4	108
6.3	<i>Ergebnisse in Bezug auf den ventralen Pfad</i>	111
6.3.1	Ergebnisse bezüglich der Hypothese 5	111
6.3.2	Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im ventralen Pfad – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 6	118
6.4	<i>Ergebnisse in Bezug auf den Gyrus praecentralis</i>	121
6.4.1	Ergebnisse bezüglich der Hypothesen 7 und 8	121
6.4.2	Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Gyrus praecentralis	126
7	Diskussion des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis	129
7.1	<i>Diskussion der Untersuchungsergebnisse des Wernicke-Areals</i>	129
7.1.1	Die Aktivierungsmuster aller Gruppen im Wernicke-Areal	129
7.2	<i>Diskussion der Untersuchungsergebnisse des Broca-Areals</i>	138
7.2.1	Die Aktivierungsmuster der hörenden Gruppen im Broca-Areal	139
7.2.2	Die Aktivierungsmuster der Gehörlosen im Broca-Areal	143
7.2.2.1	Das Broca-Areal als modalitätsunabhängiges Sprachareal	144
7.2.2.2	Das Broca-Areal als modalitätsabhängiges Sprachareal	145
7.2.2.3	Methodologische Kritik und soziodemografische Unterschiede	146
7.3	<i>Diskussion der Untersuchungsergebnisse des ventralen Pfades</i>	150
7.3.1	Die Aktivierungsmuster aller Gruppen im ventralen Pfad	150
7.4	<i>Diskussion der Untersuchungsergebnisse im Gyrus praecentralis</i>	155
8	Grundlagen des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior	161
8.1	<i>Lage und Funktion</i>	161
8.2	<i>Veränderungen durch Deprivation oder stärkere Beanspruchung</i>	162
8.2.1	Plastische Veränderungen und Aktivitätsveränderungen als Folge von Kompensationsvorgängen	163
8.2.2	Cross-modale Reorganisationsprozesse	166
8.3	<i>Mechanismen der cross-modalen Plastizität</i>	166
9	Hypothesen des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior	169
10	Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior	170
10.1	<i>Allgemeines zur Auswertung der fMRT-Daten des Bilder-Paradigmas</i>	171
10.2	<i>Gyri temporales transversi und Gyrus temporalis superior</i>	172
11	Diskussion des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior	176
11.1	<i>Aktivierungen im primären auditiven Kortex</i>	177
11.2	<i>Aktivierungen im sekundären auditiven Kortex</i>	179

12 Grundlagen des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad	183
12.1 <i>Verarbeitung und Weiterleitung visueller Stimuli in der retinogenikulosträren Bahn zu den kortikalen Projektionsgebieten.....</i>	184
12.2 <i>Lage und Funktion.....</i>	186
12.3 <i>Entwicklungen der Modellvorstellungen zum dorsalen und ventralen Pfad.....</i>	187
12.4 <i>Die Funktion des dorsalen Pfades bei der Verarbeitung bewegter Bilder und bei der Perzeption von Fremd- und Eigenbewegungen.....</i>	188
13 Hypothesen des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad.....	192
14 Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad	193
15 Diskussion des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad	200
15.1 <i>Diskussion zum dorsalen Pfad.....</i>	200
15.1.1 <i>Verbesserung visueller Fertigkeiten bei Gehörlosen und die Rolle des parietalen Kortex</i>	202
15.1.2 <i>Diskussion der Aktivierungsmuster im SPC (= superiorer parietaler Kortex) bei Hörenden und Gehörlosen.....</i>	205
15.2 <i>Diskussion zum ventralen Pfad.....</i>	210
15.3 <i>Diskussion von Besonderheiten in den Aktivierungsmustern.....</i>	213
15.3.1 <i>Ventrale Aktivität bei der Verarbeitung der Kategorie „Wort“</i>	213
15.3.2 <i>Aktivierungen im dorsalen Pfad außerhalb der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“</i>	213
16 Grundlagen des Motorik-Paradigmas.....	215
16.1 <i>Plastizität des primärmotorischen Kortex (M1) und dessen Veränderungen aufgrund alternierender Bedingungen.....</i>	215
16.1.1 <i>Veränderungen der Repräsentationsareale von Körperregionen am Beispiel von Geigern, Pianisten, Braille-Lesern und Verletzten</i>	217
16.1.2 <i>Plastische Veränderungen bei Stroke-Patienten durch die <i>Constraint-induced movement therapy (CIMT)</i> und ihre Gemeinsamkeiten zu gebärdenden Gehörlosen</i>	220
16.1.3 <i>Deutliche Dissoziationen in den Befunden zur Somatotopie der Hände und Finger im primärmotorischen Kortex</i>	222
16.1.4 <i>Das geeignete Paradigma und die sinnvolle Weiterverarbeitung der Daten zur Darstellung der Hand.....</i>	224
17 Hypothesen des Motorik-Paradigmas	226
17.1 <i>Größe des Repräsentationsareals der Hände in M1.....</i>	226
17.2 <i>Ausdehnung der Handrepräsentation</i>	227
17.3 <i>Quotientenbildung</i>	228
18 Methode des Motorik-Paradigmas	229
18.1 <i>Probanden</i>	229
18.2 <i>Aufgabe.....</i>	229
18.3 <i>Hypothesengeleitete Verarbeitung der Daten.....</i>	231
19 Ergebnisse des Motorik-Paradigmas.....	234
19.1 <i>Lokalisation der Finger- und Handrepräsentationen</i>	234
19.2 <i>Prüfung der Hypothese II</i>	237
19.2.1 <i>Darstellung der Aktivierungsumfänge (Number-of-Voxel) für das Tapping mit der rechten Hand.....</i>	239

19.2.2	Darstellung der Aktivierungsumfänge (Number-of-Voxel) für das Tapping mit der linken Hand.....	242
19.3	<i>Prüfung der Hypothese 12</i>	246
19.4	<i>Prüfung der Hypothese 13</i>	248
20	Diskussion des Motorik-Paradigmas	251
20.1	<i>Fehlende Intensität der Hand- und Fingerbenutzung</i>	252
20.2	<i>Methodologische Kritik und technische Beschränkungen</i>	254
20.3	<i>Automatisierung und Auslagerungen der Aktivierungen</i>	256
20.4	<i>Ökonomisierungs- und Kompensationsprozesse</i>	257
21	Zusammenfassende Diskussion	259
21.1	<i>Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Bilder-Paradigmas</i>	259
21.2	<i>Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Motorik-Paradigmas</i>	271
22	Ausblick	273
	Literaturverzeichnis	276
	Abkürzungsverzeichnis	296
	Abbildungsverzeichnis	299
	Tabellenverzeichnis	304
	Formelverzeichnis.....	307

1 Einleitung

„Gebärdensprache bedeutet mit den Händen sprechen und mit den Augen hören.“

Wenn sich zwei Gehörlose miteinander unterhalten, erschließt sich für einen Hörenden aus den aneinander gereihten Bewegungen kaum ein Sinn. Seit dem Beginn meiner Ausbildung zur Gebärdensprachdolmetscherin interessiert mich, was im Gehirn eines Gehörlosen vor sich geht, wenn er Bewegungsabfolgen seines Gegenübers wahrnimmt, die sich dann für ihn zu einem sinnvollen Kontext zusammenfügen.

Auf der Suche nach einer sensitiven Methode zur Messung der Hirnaktivitäten gelang für diese Untersuchung eine Kooperation der Martin-Luther-Universität Halle / Wittenberg; Fachbereich Musik-, Sport- und Sprechwissenschaft mit dem Lehrstuhl für Biologische und Klinische Psychologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Im Rahmen dieser Kooperation war es möglich, die sowohl in der klinisch-diagnostischen als auch experimentalwissenschaftlichen Arbeit häufig verwendete Methode *funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT)* anzuwenden.

Im Mittelpunkt meines Interesses standen Fragen bezüglich der Verarbeitung von bewegungsrelevanten und bewegungsinduzierenden Merkmalen. Dazu wurde ein Paradigma zur Untersuchung der kortikalen Verarbeitungsprozesse verschiedener Stimuli entwickelt.

Es wurden Gehörlose, Gebärdensprachdolmetscher und altersparallelisierte, hörende Kontrollgruppen gemessen, denen sechs verschiedene Bilder-Kategorien dargeboten wurden. Um Unterschiede und Gemeinsamkeiten bezüglich der Verarbeitung von Gebärden- und Lautsprache festzustellen, wurden Hirnareale festgelegt, bezüglich derer sinnvolle und vergleichende Analysen der kortikalen Verarbeitung dieser beiden Sprachmodalitäten möglich waren. Des Weiteren wurde ein Paradigma entwickelt, welches sich mit der Klärung von Fragen zu Veränderungen der zerebralen Handrepräsentation der Gehörlosen durch ihren alltäglichen Mehrgebrauch der Hände während der Ausführung von Gebärdensprache beschäftigte. Folglich bestand die Untersuchung aus einem Bilder-Paradigma und einem Motorik-Paradigma, die hier in der Arbeit auch getrennt vorgestellt werden.

Zunächst wird im theoretischen Teil dieser Arbeit auf die Ätiologie und Epidemiologie der Gehörlosigkeit kurz eingegangen (Kapitel 2). Im Anschluss daran erfolgt die detaillierte Beschreibung der hier interessierenden Hirnareale. Um trotz der Komplexität der Studie Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden die Areale, die von Interesse waren, in ihrer Gesamtheit dargestellt. Das bedeutet, dass zunächst ein theoretischer Überblick über die Befunde der Literatur gegeben wird. Nach der Beschreibung der Theorie werden die Hypothesen formuliert. Abschließend werden für jedes Hirnareal die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert (Kapitel 3, 4, 5, 6). Zwei Hirnstrukturen, deren Ergebnisse besondere Beachtung verdienen, werden separat behandelt. Dabei wird nach dem gleichen Prinzip verfahren, wie eben beschrieben (Kapitel 8 bis 15).

Nach Darstellung aller für das Bilder-Paradigma interessanten Areale, wird in den Kapiteln 16 bis 20 auf die theoretischen Grundlagen, Hypothesen, Ergebnisse und die Diskussion der Ergebnisse eingegangen. Eine zusammenfassende Diskussion in Kapitel 21 dient einem Überblick aller Ergebnisse und einer kritischen Auseinandersetzung mit diesen. Abschließend wird ein Fazit und Ausblick gegeben (Kapitel 22).

2 Theorie Gehörlosigkeit

2.1 Definition und Abgrenzung des Begriffes „Gehörlosigkeit“

Der Begriff Gehörlosigkeit wird in der Literatur von verschiedenen Standpunkten aus unterschiedlich definiert. Zenner (1997) legte als Kriterium zur Definition fest, ob ein Hörverlust auf beiden Ohren oder nur einem vorliegt. Seiner Ansicht nach spricht man von Gehörlosigkeit, wenn der Hörverlust beide Ohren betrifft. Boeninghaus (1993) dagegen spricht von Gehörlosigkeit, wenn der Hörverlust vor Erwerb der Sprache stattfindet. Er grenzt gleichzeitig die Gehörlosigkeit vom Begriff Taubheit ab, welche durch einen Hörverlust nach Spracherwerb gekennzeichnet ist.

Eine klare begriffliche Einordnung gelang Probst, Grevers und Iro (2004). Sie bezeichneten Menschen als gehörlos, bei denen der Gehörsinn nicht ausgebildet ist und folglich die Hörfähigkeit fehlt. Auch bei Einsatz technischer Hörhilfen sind keine oder nur sehr begrenzte Höreindrücke vorhanden. Da die hier untersuchten Probanden der Definition von Probst et al. (2004) entsprechen, werden in der vorliegenden Arbeit alle hörgeschädigten Probanden unter dem Begriff „Gehörlose“ zusammengefasst. Des Weiteren muss, abhängig vom eintretenden Zeitpunkt, zwischen angeborener und erworbener Gehörlosigkeit unterschieden werden. Tritt die erworbene Hörschädigung vor der Sprachentwicklung ein, ist von prälingualen Gehörlosen die Rede. Bei Eintritt nach erfolgter Sprachentwicklung spricht man von postlingualen Gehörlosen (vgl. Internetadresse IV, Medicine worldwide, 2004). Hörschädigungen können mithilfe audiometrischer Untersuchungen in verschiedene Schweregrade eingeteilt werden. Bei einem Hörverlust von mehr als 110 dB (Dezibel) wird die betroffene Person als gehörlos eingestuft (vgl. Probst et al., 2004).

2.2 Epidemiologie der Gehörlosigkeit

Aus Deutschland liegen derzeit keine gesicherten Angaben zur Prävalenz neonataler (= angeborener) Hörstörungen vor. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es insgesamt circa 60.000 Gehörlose, das entspricht ungefähr 0,1% der Bevölkerung (vgl. Henke & Huber, 1998).

Die Inzidenz von Hörstörungen liegt bei einem von Tausend Neugeborenen pro Jahr. In den ersten Lebensjahren steigt die Anzahl der hörgeschädigten Kinder um 30-50%. Einer aktuellen Angabe von Probst et al. (2004) zufolge werden in Deutschland jährlich etwa 600 gehörlose Kinder mit vollständigem Hörverlust geboren.

2.3 Physiologische Leitung akustischer Stimuli über die Hörbahn

Zunächst treffen akustische Stimuli in Form von Schallwellen auf das Außenohr. Von dort werden sie über das Trommelfell auf die Gehörknöchelchenkette des Mittelohres, bestehend aus Hammer, Amboss und Steigbügel, weitergeleitet. Durch den Kontakt des Steigbügels mit der Membran des ovalen Fensters der Cochlea werden Schwingungen nach Durchlaufen des Mittelohres auf das Innenohr übertragen. In der Folge werden zunächst Perilymphbewegungen und dann Endolymphbewegungen ausgelöst. Durch die Schwingungen der Endolymph kommt es zur Entstehung von elektrischen Signalen an den äußeren Haarzellen, die zu den inneren Haarzellen weitergeleitet werden. Die weiteren Umschaltprozesse und -stellen, über die das entstandene Nervensignal in der Hörbahn zur primären Hörrinde weitergeleitet wird, sind der Abbildung 2.1 zu entnehmen. Der primär auditive Kortex steht in enger Verbindung mit der sekundären Hörrinde. In den letztgenannten Hirnarealen werden auditive Stimuli wahrgenommen und erfahren eine interpretative Weiterverarbeitung (vgl. Trepel, 1999).

Die Leitung akustischer Reize über die eben beschriebene Hörbahn und ihre Wahrnehmung sowie die Interpretation laufen bei normal Hörenden ohne Einschränkungen ab. Bei gehörlosen Menschen dagegen liegen in den entscheidenden Entwicklungsstadien zur Ausbildung der Hörfunktionen Defizite vor, welche im Folgenden kurz umrissen werden sollen.

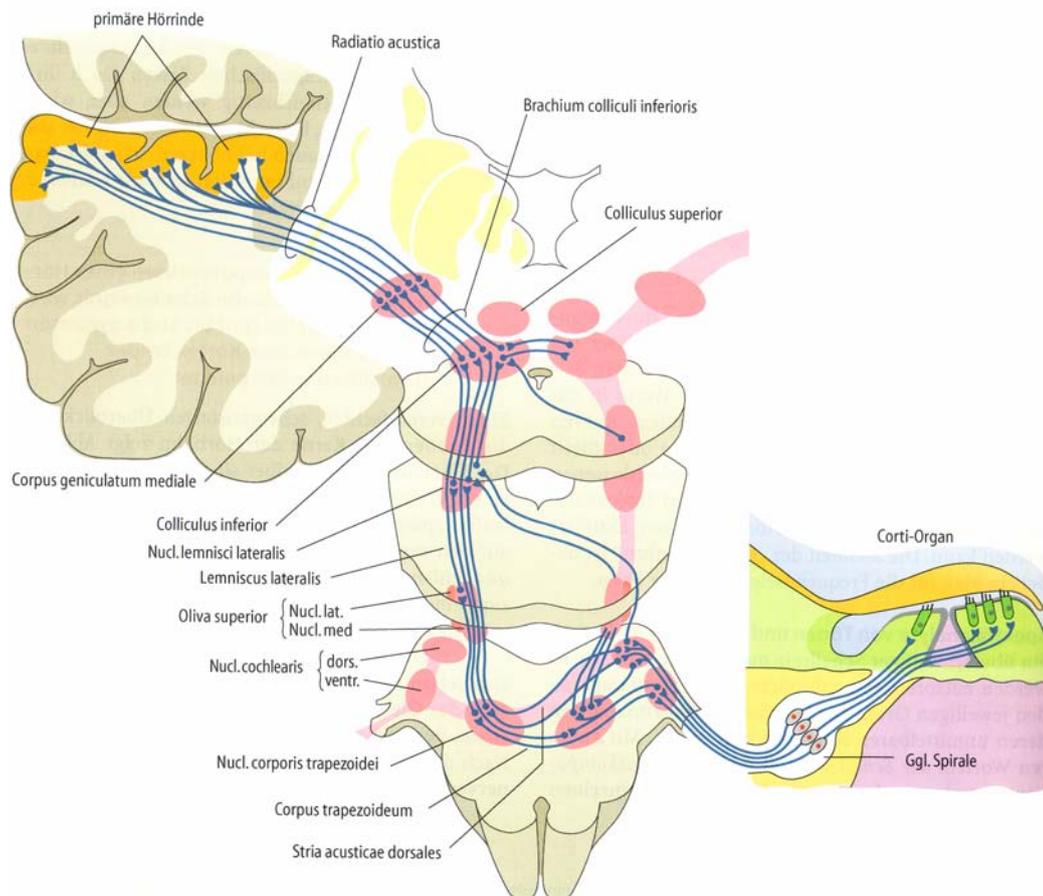


Abbildung 2.1 Schematischer Überblick über den Verlauf der Hörbahn. Eingezeichnet sind die Bahnen eines Ohres (Quelle: Birbaumer & Schmidt, S. 242, 2003).

2.4 Ätiologie der Gehörlosigkeit

Bei den Ursachen zur Entstehung von Gehörlosigkeit unterscheidet man *genetisch hereditäre* und *erworbene* Schädigungen. Die Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der häufigsten Ursachen (vgl. Boenninghaus, 1993; Probst et al., 2004; Internetadresse IV, 2004).

Tabelle 2.1: Übersicht der häufigsten Ursachen von Hörschäden (Quelle: in Anlehnung an Boenninghaus, 1993; Probst et al., 2004; Internetadresse IV, 2004)

Einteilung der Ursachen		Ätiologie	Risikofaktoren
1 genetisch hereditäre Hörschäden	1.1 sporadische (rezessive) Schwerhörigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstörungen im Bereich: Schnecke, Hörnerven, zentrale Bahnen 	<ul style="list-style-type: none"> beide Eltern als Träger der Erbanlage
	1.2 dominante (progressive) Schwerhörigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsstörungen im Bereich: Schnecke 	<ul style="list-style-type: none"> ein Elternteil als Träger der Erbanlage
2 erworbene Hörschäden		<ul style="list-style-type: none"> Embryopathia rubeolosa Thalidomidschäden 1960/61 Connatale Lues Toxoplasmose 	<ul style="list-style-type: none"> Rötelerkrankung der Mutter Einnahme des Medikamentes Contergan Lueserkrankung der Mutter
	2.1 pränatal erworben (intrauterin)		<ul style="list-style-type: none"> Stoffwechselerkrankungen der Mutter (z. B. Hypothyreose) Alkoholabusus der Mutter Medikamenteneinnahme mit ototoxischer Wirkung, z. B. Antibiotika, Diuretika, Zytostatika
	2.2 perinatal erworben (Geburt)	<ul style="list-style-type: none"> Perinatale Hypoxie Kernikterus durch Hyperbilirubinämie bei Erythroblastosis fetalis Rubellasyndrom 	<ul style="list-style-type: none"> Geburtskomplikationen Rh-Inkompatibilität zwischen Mutter / Kind Neugeborenen-Asphyxie
	2.3 postnatal erworben (nach der Geburt)	<ul style="list-style-type: none"> Labyrinthitis / Meningitis / Enzephalitis Mumps, Masern, Zoster oticus Schädelfrakturen chronische Mittelohrentzündung toxische Schäden 	<ul style="list-style-type: none"> bakterielle / virale Infektionskrankheiten Infektionskrankheiten Stürze / mechanische Ursachen Streptomycin

2.5 Allgemeines zur Darstellung von Studien und Befunden zu Veränderungen der Hirnfunktionen und -strukturen bei gehörlosen Menschen

Aufgrund der Fortschritte im Bereich von Hörimplantaten (z. B. Cochlea-Implantat = CI) wurden in den letzten Jahren gehäuft Untersuchungen und Studien mit Gehörlosen durchgeführt. Zahlreiche Forschungs- und Arbeitsgruppen befassten sich mit dieser sensorisch deprivierten Personengruppe und ihren Unterschieden bzw. Gemeinsamkeiten zu normal hörenden Personen. Durch Veränderung des akustischen Inputs bei gehörlosen Menschen stand immer wieder die Erforschung veränderter Sprach- oder Bildverarbeitung im Vordergrund. Dabei lag das Hauptinteresse nicht auf einem bestimmten Bereich des Gehirnes. Die Ergebnisse der bildgebenden Verfahren zielten häufig auf mehrere Hirnareale gleichzeitig ab, in denen sich Veränderungen bei der Verarbeitung dargebotener Stimuli bei Gehörlosen zeigten.

Die Hirnareale werden dabei nach der Einteilung von Brodmann benannt. Der Berliner Neuroanatom und Psychiater *Korbinian Brodmann* definierte 1909 in seinem Standardwerk „Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde“ die nach ihm benannten Brodmann-Areale (= BA). Abbildung 2.2 zeigt seine fortlaufend durchnummerierten Gebiete der Großhirnrinde, welche nach zyto- und myeloarchitektonischen Gesichtspunkten eingeteilt wurden.

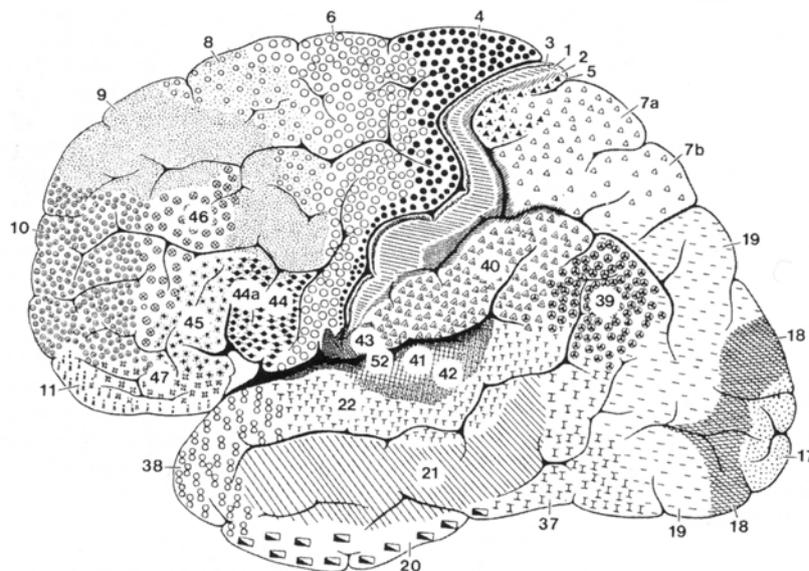


Abbildung 2.2:

Gliederung und Nummerierung der Rindenfelder nach Brodmann; laterale Ansicht der linken Großhirnhemisphäre (Quelle: Trepel, S. 178, 1999)

Da die Strukturen der einzelnen Felder in einer, wenn auch relativ groben, Beziehung zu bestimmten physiologischen Funktionen stehen, und die Nummerierung der Rindengebiete international gilt, werden die Brodmann-Areale von zahlreichen Arbeitsgruppen zur Standardisierung der Lokalisation von Aktivitäten herangezogen und benutzt (vgl. Internetadresse III, Spektrum Akademischer Verlag, 2004). Bei der Darstellung der Grundlagen, Ergebnisse und Diskussionen der untersuchten bzw. aktivierten Areale werden die Brodmann-Areale genutzt, daher dient die Abbildung 2.2 als Orientierung.

Im Folgenden werden alle für diese Studie interessierenden Hirnregionen mit den jeweiligen Befunden und Studien der Literatur sowie die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

3 Grundlagen des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis

In der vorliegenden fMRT-Studie (fMRT= funktionelle Magnetresonanztomografie) werden Gehörlose, Hörende und Gebärdensprachdolmetscher bezüglich ihrer Verarbeitung sprach- und bewegungsrelevanter Stimuli untersucht (für detaillierte Darstellung der Methode und des Stimulusmaterials siehe Kapitel 5.3 bis 5.6). Dabei steht die Klärung der Frage im Vordergrund, ob und wenn ja, welche Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten sich in der kortikalen / zerebralen Verarbeitung bezüglich der dargebotenen Stimuli zwischen den Gruppen ergeben. Im folgenden Kapitel sollen die zerebralen Besonderheiten aufgezeigt werden, die durch den Gebrauch einer manuellen Sprache und die auditive Deprivation bei Gehörlosen hervorgerufen werden. Außerdem soll versucht werden, aufzudecken, welche Auswirkungen die Gehörlosigkeit auf die Sprachverarbeitung und die zerebrale Repräsentation von Sprache hat. Im Anschluss daran werden die Hirnareale vorgestellt, die für die Verarbeitung der dargebotenen Stimuli von Interesse sind und welche besonderen Fragestellungen mit diesen Arealen verbunden sind. Bevor allerdings die Areale vorgestellt werden, sollen im folgenden Kapitel zunächst grundlegende Fragen beantwortet werden, deren Klärung entscheidend für das Verständnis eines Vergleiches der neuronalen Prozesse bei der Verarbeitung von Gebärdensprache und Lautsprache ist:

- Wie entwickelt sich die Lautsprache bei Hörenden und welche Hirnareale sind für die zerebrale Repräsentation dieser Sprache verantwortlich?
- Wie entwickelt sich die Gebärdensprache bei Gehörlosen und welche Hirnareale sind für die zerebrale Repräsentation dieser Sprache verantwortlich?
- Welche Besonderheiten ergeben sich durch den Gebrauch einer Gebärdensprache und welche Auswirkungen haben diese auf die zerebrale Repräsentation dieser Sprachform?
- Welche Hirnareale werden zur Verarbeitung besonderer Merkmale der Gebärdensprache genutzt und welche Aufgaben erfüllen sie in Bezug auf die Verarbeitung einer visuell-manuellen Sprache?
- Welche neuronalen Besonderheiten ergeben sich aus einem bilingualen (= Laut- und Gebärdensprache) Spracherwerb und –gebrauch?

- Wie verarbeiten Hörende und Gehörlose dargebotene international verständliche Gesten und wo liegen Unterschiede bei diesen beiden Gruppen in der Verarbeitung der gebärdensähnlichen Kategorie (Darstellung der Kategorien siehe Abschnitt 5.3)?

3.1 Sprache bei Hörenden

Zunächst sollen ein kurzer Abriss über die Sprachentwicklung bei Hörenden sowie ein Überblick zur zerebralen Repräsentation der Lautsprache gegeben werden. Diese Vorstellung ist wichtig, um die Gebärdensprachnutzer mit ihrer jeweiligen Kontrollgruppe bezüglich aller interessierenden Aktivierungen vergleichen zu können.

3.1.1 Sprachentwicklung bei Hörenden

Wenn vergleichende Studien zwischen Laut- und Gebärdensprache bezüglich deren kortikaler Verarbeitungen angestellt werden, sollte zunächst geklärt werden, ob beide Sprachmodalitäten vergleichbar erworben werden. Im Folgenden wird die Sprachentwicklung gesprochener Sprache durch den steten Einfluss von auditiven Ausdrücken vorgestellt.

Zunächst beginnen hörende Kinder etwa ab dem sechsten Monat zu „lallen“. Etwa mit dem Beginn des zehnten Monats setzt dann die Phase der „Vokalisierung“ ein, an deren Anschluss dann Wörter gebildet werden. Die Entwicklung von der Vokalisierung zum Wort wird als „Dekontextualisierungs-Prozess“ beschrieben (Volterra & Erting, 1990). Dieser Prozess wird bei hörenden Kindern im Alter von zwölf Monaten durchlaufen (Worte werden außerhalb eines unmittelbar vorhandenen Kontexts angewandt). Mit 18 Monaten beginnen hörende Kinder zwei Wörter miteinander zu kombinieren und Zwei- bis Dreiwort-Sätze zu bilden. Hier zeigt sich zum ersten Mal ein Unterschied von hörenden zu gehörlosen Kindern. Bei der Kombination von Symbolen bleibt jede der beiden Kindergruppen in ihrer Modalität, was bedeutet, dass Wörter nicht mit Gebärden verbunden werden. Die semantischen Muster beim Kombinieren sind dagegen in beiden Gruppen vergleichbar (vgl. Newport & Meier, 1986).

Der Gesamtverlauf kann grob in drei Phasen gegliedert werden: die *vorsprachliche Phase*, die *Phase der Spracheinführung* und die *Phase des Aufbaus eines sprachlichen Systems*. In der ersten Phase werden zunächst Grundmuster vom Baby eingeübt (Brabbeln) und

lediglich Sprachlaute wahrgenommen bzw. selber produziert. Im nächsten Entwicklungsabschnitt kommt es zu ersten Verknüpfungen von Wort und Bedeutung und die eigene Sprache wird ausgetestet. In der dritten Phase werden Zwei- und Dreiwort-Sätze gebildet. Außerdem wird erlernt, dass Wörter in einem bestimmten Kontext stehen. Somit können Darstellungs- und Zeigefunktionen erlernt werden (vgl. Oerter & Montada, 2002).

3.1.2 Zerebrale Repräsentation von Lautsprache

Der folgende Abschnitt soll die Frage klären, welche Hirnareale als klassische Sprachareale für die Verarbeitung von Lautsprache verantwortlich sind und in welchen Strukturen sprachliche und nicht-sprachliche Elemente verarbeitet werden.

3.1.2.1 Verarbeitung sprachlicher Stimuli

Es ist bisher nachgewiesen worden, dass die linke Hemisphäre eine dominante Rolle bei der Verarbeitung von Sprache spielt (vgl. Nöth, 1992). Rein linkshemisphärische Aufgaben sind die Produktion der Syntax und das Sequenzieren von Silben (vgl. Kolb & Whishaw, 1996).

Nach den Untersuchungen von Poizner, Klima und Bellugi (1990) an gehörlosen und hörenden Läsionspatienten gilt es inzwischen als sehr wahrscheinlich, dass nicht die Modalitäten „Hören“ und „Sprechen“ zur Ausbildung der funktionellen Dominanzen in dem Hemisphären nötig sind, sondern der Erwerb einer Muttersprache. Poizner et al. (1990) postulierten, dass nicht die hörende Umwelt eine prägende Funktion bei der ontogenetischen Ausgestaltung der funktionellen Arbeitsteilung der Hemisphären hat, sondern der Mensch mit grundlegenden und allgemeingültigen neuronalen Organisationsstrukturen für Erwerb und Gebrauch von Sprache ausgestattet ist. Die linke Hirnhälfte besitzt somit eine angeborene Prädisposition für die zentralen Bestandteile von Sprache unabhängig von der Sprachmodalität (vgl. Poizner et al., 1990).

3.1.2.2 Verarbeitung nicht-sprachlicher Stimuli

Die rechte Hemisphäre ist dagegen an der Verarbeitung semantischer Strukturen nur beteiligt und spielt eher eine wesentliche Rolle für Prosodie (Aspekte der Sprachmelodie).

Anhand zahlreicher Studien konnte nachgewiesen werden, dass die rechte Hemisphäre für Verarbeitung nicht-sprachlicher Elemente (z. B. räumliche Aspekte) verantwortlich ist (vgl. Poizner et al., 1990). Die Betrachtung der Verarbeitung nicht-sprachlicher Stimuli bei Hörenden an dieser Stelle dient einem späteren Vergleich mit den Gehörlosen. Die gefundenen Verarbeitungsmuster bei Hörenden stimmen in vielen Aspekten mit denen von gebärdensprachlich kommunizierenden Gehörlosen überein. Somit existiert eine prinzipielle Gleichwertigkeit von Laut- und Gebärdensprachen aus neuropsychologischer Sicht (vgl. List, 1991).

3.2 Sprache bei Gehörlosen

Mittels welcher Strategien erwirbt nun ein gehörloses Kind die Gebärdensprache und welche Parallelen finden sich zum Erwerb der Lautsprache bei Hörenden? Um solche Fragestellungen unter vergleichbaren Bedingungen beantworten zu können, wurden Studien unter anderem an dem Teil der Gehörlosen durchgeführt, deren Eltern ebenfalls gehörlos waren (~10% aller Gehörlosen). Somit konnte gewährleistet werden, dass sich diese Kleinkinder die Gebärdensprache als ihre Muttersprache in einer natürlichen Lernsituation aneignen konnten (vgl. Boyes Bream, 1995). Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf Kinder mit diesen Voraussetzungen.

3.2.1 Sprachentwicklung bei Gehörlosen

Auch gehörlose Babys beginnen etwa ab dem sechsten Monat zu „lallen“. Mit dem zehnten Lebensmonat setzt bei ihnen dann das „manuelle Brabbeln“ ein. Obwohl die Bewegungen dieses Brabbelns oft als erste Gebärden verstanden wurden, wiesen Volterra & Erting (1990) durch zahlreiche Untersuchungen an hörenden und gehörlosen Kindern nach, dass es sich beim manuellen Brabbeln zunächst nur um Gesten handelt und nicht um Gebärden. Dies versteht sich analog zu hörenden Kindern und deren Phase von „Vokalisierung“. Bei Gehörlosen bezeichnet der „Dekontextualisierungs-Prozess“ die Entwicklung von einer Geste zur Gebärde. Dieser Prozess wird, wie bei Hörenden, im Alter von zwölf Monaten durchlaufen (Gebärden werden außerhalb eines unmittelbar vorhandenen Kontextes angewandt). Mit 18 Monaten beginnen Gehörlose, zwei Gebärden miteinander zu kombinieren. Wie schon in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, findet keine Kombination von

Wörtern mit Gebärden statt. Die semantischen Muster beim Kombinieren sind dagegen in beiden Gruppen vergleichbar (vgl. Newport & Meier, 1986). Zusammenfassend stellten die bisherigen Studien fest, dass Gebärdensprachen in gleicher Art und Weise und in gleichen linguistischen Phasen wie Lautsprachen erworben werden. Sowohl hörende als auch gehörlose Kinder durchlaufen die frühen Entwicklungsstufen des Spracherwerbes gleichermaßen (vgl. Lillo-Martin & Klima, 1990).

3.2.1.1 Unterschiede zwischen frühem und spätem Spracherwerb bei Gehörlosen

Für die eben berichteten Ergebnisse wurden gehörlose Kinder untersucht, die von Geburt an Kontakt zur Gebärdensprache hatten, da ihre Eltern ebenfalls gehörlos waren. Wie aber stellen sich Lernstrategien im Spracherwerb dar, wenn die Gebärdensprache nicht primärsprachlich, sondern später erworben wird (bei 90% aller Gehörlosen der Fall)? Es konnte nachgewiesen werden, dass Gebärdensprachen weniger gut beherrscht werden, je später sie gelernt werden (vgl. Newport, 1988). Für die Interpretation der Untersuchungsergebnisse von großer Bedeutung ist neben dem Wissen, dass die Gebärdensprache schlechter beherrscht wird, der Umstand, *wie* Spätlernende die Gebärdensprache erwerben. Supalla & Newport (1980) fanden heraus, dass Gehörlose, die Gebärdensprache bei Eintritt in das Schulalter erlernten, diese eher „ganzheitlich“ erlernen und von Gebärdensprachevarianten auf inkonsequente Weise Gebrauch machen. Das bedeutet, dass diese Gruppe der Gehörlosen nicht die grammatikalisch-semantischen Feinheiten und den Aufbau der Sprache in der Abfolge der eben beschriebenen Schritte erlernt, sondern sich eher ganze Wörter in einem bestimmten Kontext aneignet, ohne diese Wörter anhand verschiedener Situationen und Silbe für Silbe zu erwerben (vgl. Supalla & Newport, 1980). Die Gruppe der Spätlernenden zeichnet sich durch explizite (bewusste) Sprachaneignung aus, wogegen Kleinkinder Sprache implizit (unbewusst) erlernen. Diese ganzheitliche Strategie der Spätlernenden steht in starkem Kontrast zu den Spracherwerbsstrategien der primärsprachlichen Gebärdenden, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden. Zusammengefasst erwirbt der spätlernende Gehörlose die Gebärdensprache nicht nur in einem weniger komplexen Umfang, sondern auch auf andere Art und Weise, als der primärsprachliche Gehörlose (vgl. Newport, 1988). Wie in Kapitel 3.2.2.1 gezeigt wird, ist diese Tatsache von immenser Bedeutung, da herausgefunden wurde, dass es Unterschiede zwischen Früh- und Spätlernenden Gehörlosen bezüglich der Lateralisierung ihrer Hirnaktivierungen gibt (vgl. Leybaert & D’Hondt, 2003).

3.2.1.2 Die Auswirkungen unterschiedlicher Bezugspersonen, von denen die Gebärdensprache gelernt wird

Neben den unterschiedlichen Lernstrategien von Sprache gibt es bei Gehörlosen einen weiteren Faktor, der Einfluss auf die Aktivierungsmuster in den klassischen Spracharealen haben könnte: die unterschiedlichen Bezugspersonen, von denen spätlernende Gehörlose die Gebärdensprache erwerben. Die meisten Gehörlosen lernen die Gebärdensprache zwischen dem vierten und siebten Lebensjahr. Hier imitieren sie häufig eine „unvollständige“ Gebärdensprache anderer Kinder oder eine Art Zeichensystem hörender Erzieherinnen. Man kann also davon ausgehen, dass die Beherrschung der Muttersprache schon bei den Personen verschieden ist, von denen die Gebärdensprache gelernt wird. Außerdem ist unklar, ob die gehörlosen Kinder bis zum Eintritt in die Schule eher von hörenden oder gehörlosen Personen Sprache „abgeschaut“ haben. Somit unterscheiden sich auch die grammatikalisch-semantischen Grundlagen der erworbenen Gebärdensprache, wenn von einer hörenden Person (deutsche Lautsprache) oder von einer gehörlosen Bezugsperson (Deutsche Gebärdensprache = DGS) gelernt wurde. Die unterschiedlichen Lernstrategien zwischen spät- und frühlernenden Gehörlosen sowie die unmögliche Vereinheitlichung der Bezugspersonen, von denen die Muttersprache bzw. die Lautsprache gelernt wurde, erschweren die Erstellung einer einheitlichen, standardisierten Untersuchungsgruppe. Der unspezifische und unterschiedliche Gebärdenspracherwerb führt vermutlich zu verschiedenen sprachlichen Mustern und somit zu unterschiedlichen Voraussetzungen für die Verarbeitung von Gebärden- und Gestenbildern oder Wörtern.

3.2.2 Zerebrale Repräsentation von Gebärdensprache

An dieser Stelle kann kurz zusammengefasst werden, dass zumindest die Spracherwerbsstrategie zwischen Laut- und Gebärdensprache vergleichbar ist, wenn die Gebärdensprache von Geburt an gelernt wurde.

Der folgende Abschnitt soll die Frage klären, welche Hirnareale als klassische Sprachareale für die Verarbeitung von Gebärdensprache identifiziert wurden und wo Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zur Lautsprache liegen.

3.2.2.1 Verarbeitung sprachlicher Stimuli

Anhand von Läsionsstudien an links- und rechtshemisphärisch geschädigten Gehörlosen konnte nachgewiesen werden, dass die Verarbeitung von sprachlichen Elementen (Grammatik, Semantik etc.) der Gebärdensprache vorrangig linkshemisphärisch stattfindet (vgl. Poizner et al., 1990). Die linke Hirnhälfte besitzt somit eine angeborene Prädisposition für die zentralen Bestandteile von Sprache, unabhängig von der Sprachmodalität (vgl. Poizner et al., 1990). Auch Untersuchungen von List (1991) an gehörlosen Patienten mit Hirnläsionen zeigten vergleichbare sprachliche Defizite zu Hörenden mit analogen Verletzungen. So zeigten Gehörlose mit einer linkshemisphärischen Läsion, die schon lange die Gebärdensprache als Muttersprache ausführten, eine Gebärdenspracheaphasie, wogegen Patienten mit Schäden der rechten Hemisphäre keine Sprachdefizite aufwiesen (vgl. List, 1991).

Somit ist nachgewiesen, dass weder der Gebrauch einer manuellen Sprache noch die auditive Deprivation im kritischen Spracherwerbsfenster zu Veränderungen der sprachlichen Lateralisierungsmuster führen und sich bei Gehörlosen hinsichtlich der zerebralen Sprachstrukturierung vergleichbare Lateralisierungsmuster wie bei hörenden / sprechenden Menschen entwickeln (vgl. Homan, Criswell, Wada & Ross, 1982; Damasio, Bellugi, Damasio, Poizner & v. Gilder, 1986; Diller 1990; Bellugi & Klima, 1991).

Es sei allerdings kritisch angemerkt, dass aufgrund einer Untersuchung von Leybaert & D'Hondt (2003) inzwischen herausgefunden wurde, dass es auch zu Lateralisierungsmustern in der Verarbeitung kommen kann, die im Kontrast zu den bisherigen, klassischen Verarbeitungsmustern stehen. Die Forschergruppe stellte Vergleiche zwischen Gehörlosen, die Gebärdensprache sehr früh und als erste Muttersprache, sowie Gehörlosen, die Gebärdensprache relativ spät und unvollständig erlernt hatten, an. Die Ergebnisse zeigten, dass die „frühlernenden“ Gehörlosen eine vergleichbare, klassische Spezialisierung der linken Hemisphäre für die Verarbeitung der Muttersprache aufwiesen wie Hörende. Gehörlose, die dagegen die Gebärdensprache nicht prä-linguistisch (sondern ca. erst zwischen dem fünften und siebten Lebensjahr) erlernt hatten, wiesen eine weniger starke, linkshemisphärische Lateralisierung für die Verarbeitung der erlernten Sprache auf. Vermutlich erfahren die gehörlosen Kinder in den ersten fünf Lebensjahren keine strukturiert dargebotene Sprache und Grammatik von Seiten der Eltern, sondern eher eine Art unvollständiges Zeichensystem. Die Autoren schlussfolgerten, dass die Abwesenheit von adäquatem, strukturiertem Sprachinput

während eines kritischen Zeitfensters ein Risiko für den Verlust der Initialneigung der linkshemisphärischen Spezialisierung sein könnte. Die Gehörlosen, welche die Gebärdensprache spät erlernt hatten, wiesen also eine weniger ausgeprägte linksseitige Dominanz auf, sondern eher bilaterale Aktivierungen (vgl. Leybaert & D'Hondt, 2003). Diese Ergebnisse machen deutlich, dass eine homogene Gruppe von Gehörlosen bezüglich ihres Alters beim Erwerb der Gebärdensprache, ihrer Lernvorbilder und dem Zeitpunkt des Beginns der Gehörlosigkeit von Nöten ist, um interindividuell vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

3.2.2.2 Verarbeitung nicht-sprachlicher Stimuli

Besonders in der Gebärdensprache existieren neben sprachlichen Merkmalen der Sprache zahlreiche nicht-sprachliche Elemente. Für die Gehörlosen bedeutet nicht-sprachlich z. B. die Analyse von Fremd- und Eigenbewegung, die Stellung der Hände im Raum oder die Wahrnehmung von Emotionen. Im Gegensatz zur Lautsprache steht die Analyse räumlicher Merkmale und körpereigener Bewegungen im Raum im Vordergrund. Poizner et al. (1990) untersuchten links- und rechtshemisphärisch geschädigte Gehörlose bezüglich der relativen Dominanz der rechten Hemisphäre bei der Verarbeitung unterschiedlicher sprachfreier Aufgaben zur eben genannten räumlichen Analyse. Die Betroffenen mussten sprachfreie Aufgaben bewältigen, wie z. B. Nachzeichnen, Linienausrichtung angeben, Blockmuster rekonstruieren und Gesichter erkennen. Die rechtshemisphärisch Geschädigten zeigten stärkere Defizite und Ausfälle bei den Aufgaben als die Gehörlosen mit linksseitigen Verletzungen. Schäden in der rechten Hemisphäre äußerten sich in räumlicher Desorientierung, fehlenden Perspektiven im Raum und der falschen Differenzierung von Kontrasten. Das Verständnis für Gebärdensprache blieb dagegen nahezu intakt. Die Betroffenen zeigten lediglich Schwierigkeiten, Gebärden räumlich zu produzieren. Die Autoren schlussfolgerten, dass die rechte Hemisphäre bei Gehörlosen im Gegensatz zur linken auf die Verarbeitung räumlich-visueller Merkmale (sprachfrei) spezialisiert ist und somit eine klare Funktionstrennung zwischen den Hemisphären bei Gehörlosen vorliegt (vgl. Poizner et al., 1990). Wie bereits in Kapitel 3.1.2.2 beschrieben, stimmen die Verarbeitungsmuster in vielen Aspekten mit denen von lautsprachlich kommunizierenden Hörenden überein, und es kann eine prinzipielle Gleichwertigkeit von Laut- und Gebärdensprachen aus neuropsychologischer Sicht angenommen werden (vgl. List, 1991).

3.3 Besondere Anforderungen durch die Gebärdensprache und Auswirkungen auf die zerebrale Repräsentation dieser Sprachform

In den Abschnitten 3.1.2 und 3.2.2 wurde kurz skizziert, dass Merkmale, wie Emotionen, Gesichtsausdrücke und räumliche Bezüge bei beiden Sprachmodalitäten vorrangig in der rechten Hemisphäre verarbeitet werden, wogegen sprachliche Anteile sowohl in der Gebärden- als auch in der Lautsprache linkshemisphärisch verarbeitet werden. Folgendes klassisches Netzwerk ist für die Verarbeitung beider Sprachformen verantwortlich: das *Broca-Areal* innerhalb des inferioren präfrontalen Kortex, das *Wernicke-Areal* im posterioren zweiten Drittel des superioren Temporallappens, der anteriore Teil des superioren Temporallappens und der mittlere präfrontale Kortex (vgl. Bavelier, Corina & Neville, 1998a). Die Abbildung 3.1 verdeutlicht das Netzwerk der klassischen Sprachareale, die an der Sprachverarbeitung beteiligt sind.

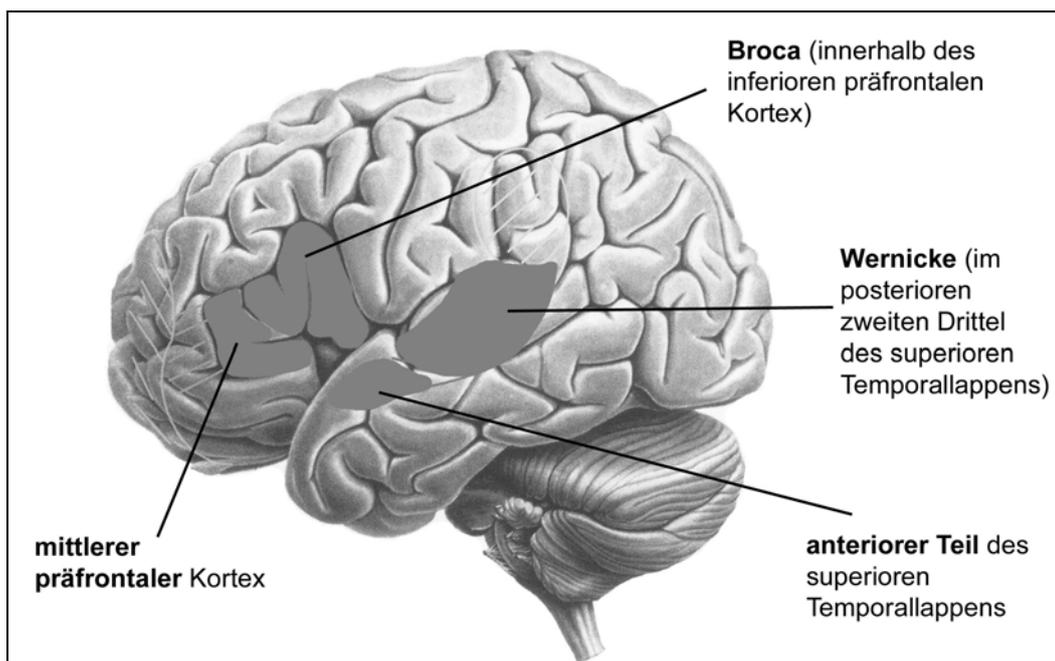


Abbildung 3.1: Grafische Darstellung der klassischen Sprachareale, die in ihrer Funktion unabhängig von der Sprachmodalität agieren (Quelle: modifiziert nach Karnath & Thier, 2003; S. 375)

Kassubek, Hickok und Erhard (2004) bestätigten die Beteiligung klassischer Sprachareale bei der Verarbeitung von Gebärden- und Lautsprache. Ihre hörenden und gehörlosen Probanden sahen die gleichen statischen Bilder von Alltagsgegenständen und sollten jedes Objekt in ihrer jeweiligen Muttersprache benennen. Bei beiden Gruppen zeigten sich die erwarteten Aktivierungen im posterioren Broca-Areal, im prämotorischen Kortex und in

den anterioren Teilen des superioren Temporallappens. Die Gehörlosen wiesen allerdings zusätzliche Aktivierungen im inferioren frontalen Gyrus, im superioren parietalen Kortex und zusätzliche Aktivierungen im okzipital-temporalen Kortex auf (vgl. Kassubek et al., 2004).

Diese nachgewiesenen Aktivierungen in zusätzlichen Arealen lassen vermuten, dass es bei Gehörlosen aufgrund der auditiven Deprivation und / oder wegen des Gebrauches einer visuell-räumlichen Sprache bei der Verarbeitung von Gebärdensprache zu von den Hörenden abweichenden Aktivierungsmustern (nicht in den klassischen Spracharealen *Wernicke* und *Broca*) kommt. Bei genauerer Betrachtung der visuell-manuellen Sprache der Gehörlosen fallen zahlreiche Besonderheiten bezüglich der Wahrnehmung und Verarbeitung von Gebärdensprache im Kontrast zur Lautsprache auf.

Der Gebrauch einer Sprache, die über Bewegungsabfolgen der Hände und Arme realisiert wird, benötigt ein Netzwerk von Hirnarealen, die für die Planung, Ausführung und Steuerung von Bewegungen verantwortlich sind. An solchen Prozessen sind unter anderem der prämotorische Kortex (= PMA), die supplementär motorischen Areale (= SMA) und der Gyrus praecentralis (= primärmotorischer Kortex) beteiligt. Auf die letztgenannte Struktur wird in Abschnitt 3.3.4 eingegangen. Die anderen beiden Areale werden aus Gründen des breiten Funktionsspektrums und ihrer weitreichenden Verknüpfungen zu weiteren Arealen nicht näher beleuchtet, da sie den Rahmen der vorliegenden Untersuchungen überschreiten. Da Gebärdensprache in einem weitaus stärkeren Umfang bestimmte Bewegungsabfolgen im Raum produziert, als es bei der Lautsprache nötig wäre, und die richtige Analyse der Bewegungen zum Verständnis notwendig ist, gewinnen auch Areale an Bedeutung, die für die Analyse von Eigenbewegungen (eigene Gebärden) und Fremdbewegungen (Gebärden des Gesprächspartners) zuständig sind. In diesem Falle spielt der Parietalkortex (dorsaler Pfad) eine wichtige Rolle, auf dessen Funktionen in Bezug auf die Verarbeitung von Gebärdensprache in Abschnitt 3.3.6 näher eingegangen wird.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass die auditive Deprivation Einfluss auf die Verarbeitung von Sprache hat. Kongenital Gehörlose nehmen von Geburt an keine akustischen Signale wahr. Folglich erhält der primäre auditive Kortex keinen akustischen Input. Wie bereits mehrfach nachgewiesen wurde, kommt es infolgedessen zu kortikalen Reorganisationsprozessen. Das bedeutet, dass das deprivierte Areal dann für die Verarbeitung von Reizen einer anderen Sinnesmodalität genutzt wird. Das Areal mit seinen

wichtigsten Funktionen für die Verarbeitung von Gebärdensprache wird zunächst kurz in Abschnitt 3.3.1 behandelt.

Außerdem ist von Interesse, ob nicht-sprachliche Merkmale, die in der Gebärdensprache eine zentrale Stellung einnehmen (z. B. Emotionen) zu unterschiedlichen Verarbeitungsmustern der Gebärdensprache gegenüber der Lautsprache führen. So spielen verschiedene Gesichtsausdrücke einer Person sowie die unterschiedlichen Gesichtsmerkmale zahlreicher Personen eine wichtige Rolle in der gebärdensprachlichen Kommunikation, da z. B. eine stimmliche Wiedererkennung von Personen nicht möglich ist. Ein Gesichtsausdruck stellt für Hörende eine rein emotionale Komponente dar. In der Gebärdensprache kann ein Gesichtsausdruck in Kombination mit einem Verb den gesamten Verlauf des Gespräches bestimmen. Der Gesichtsausdruck liefert dem Gehörlosen zusätzliche semantische Informationen, auf die er auch achten muss. Zudem ist die genaue, visuelle Analyse von Objekten für auditiv Deprivierte wichtig, da ihnen vordergründig die visuelle Sinnesmodalität zur Realisierung von Sprache zur Verfügung steht. Sowohl Objektwahrnehmung als auch alle Aspekte der Gesichterwahrnehmung und Emotionen werden vorrangig im ventralen Pfad verarbeitet, dessen Beitrag zur Verarbeitung von Gebärdensprache in Abschnitt 3.3.5 vorgestellt wird.

Die klassischen Sprachareale, Wernicke und Broca, werden auch betrachtet, da diese maßgeblich an der Sprachverarbeitung beteiligt sind (vgl. Abschnitt 3.3.2 und 3.3.3).

Aufgrund der beschriebenen Differenzen zwischen den beiden Sprachmodalitäten Gebärdensprache und Lautsprache wurden im Rahmen dieser Untersuchungen spezielle Fragestellungen formuliert und diese eben beschriebenen, sechs Hirnareale definiert, um zur Klärung der Unterschiede in der zerebralen Verarbeitung zwischen Laut- und Gebärdensprache beizutragen. Im Folgenden werden diese Areale vorgestellt, da diese in Bezug auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede der kortikalen Verarbeitung von sprach- und bewegungsbezogenen Stimuli (genauere Angaben zu den dargebotenen Stimuli sind in Abschnitt 5.3 zu finden) zwischen den Gruppen von Interesse sind. Außerdem werden ihre speziellen Funktionen bezüglich der besonderen Merkmale von Gebärdensprache dargestellt und bisherige Forschungsergebnisse diesbezüglich aufgezeigt. Aufgrund des besonderen Interesses an den Hirnstrukturen *primärer auditiver Kortex (A1)* und *dorsaler Pfad*, werden diese beiden in gesonderten Kapiteln behandelt (vgl. Kapitel 8 bis 11 sowie Kapitel 12 bis 15). Vermutlich nehmen diese beiden Areale eine Sonderstellung bei der Betrachtung der Verarbeitung von Gebärdensprache ein, da diese Sprachmodalität vor allem durch die auditive Deprivation und die Analyse von Bewegungen im Raum geprägt

ist. Aus diesem Grunde werden die zwei Areale mit einer jeweiligen Abhandlung der theoretischen Grundlagen, Hypothesen, Darstellung und Diskussion der Ergebnisse in dieser Arbeit separat geführt. Der Vollständigkeit halber werden sie aber schon hier bei der Darstellung aller relevanten Areale für die Gebärdensprachverarbeitung im theoretischen Abriss mit aufgeführt.

Eine Übersicht der anatomischen Lage aller relevanten Areale liefern die Abbildungen 3.2 bis 3.7. Im Anschluss daran wird jedes Areal kurz vorgestellt, seine Funktionen in Bezug auf die gebärdensprachliche Verarbeitung vorgestellt und erläutert, warum es von Bedeutung ist.

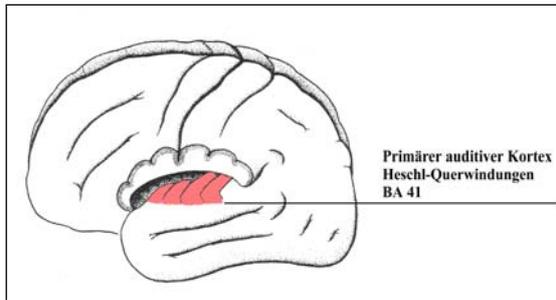


Abbildung 3.2: Lage des primären auditiven Kortex (BA 41); Maßgeblich beteiligt an: Bewusstmachung von akustischen Impulsen aus dem Innenohr (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

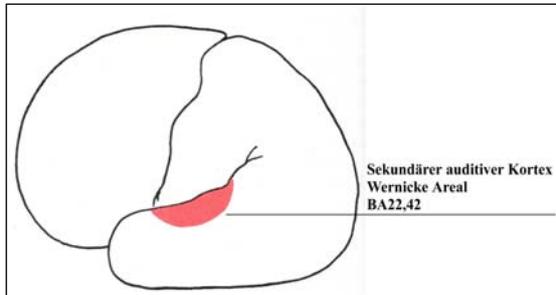


Abbildung 3.3: Lage des sekundären auditiven Kortex (BA 22, 42); Maßgeblich beteiligt an: Interpretativer und integrativer Verarbeitung von akustischen Impulsen (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

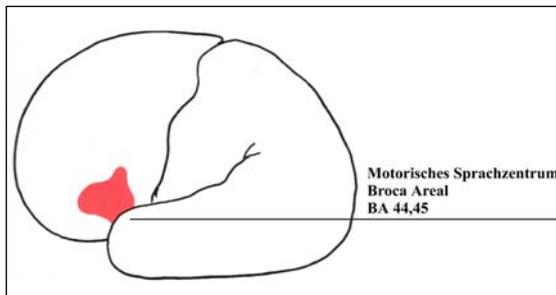


Abbildung 3.4: Lage des Broca-Areals (BA 44, 45); Maßgeblich beteiligt an: Formung von Satzbau und Wortlaut, sowie Initiierung der Muskeln, die zum Sprechen benötigt werden (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

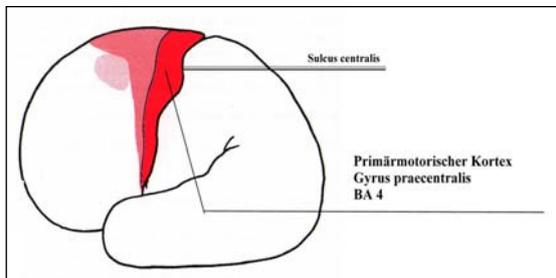


Abbildung 3.5: Lage des primärmotorischen Kortex (BA 4); Maßgeblich beteiligt an: Planung und Realisierung von Willkürbewegungen (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

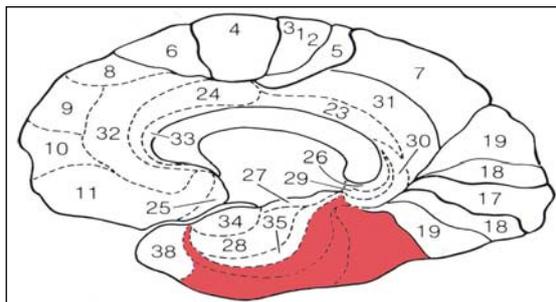


Abbildung 3.6: Lage der Areale des ventralen Pfades (BA 20, 36, 37); Maßgeblich beteiligt an: Objekterkennung („WAS“-Pfad) (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

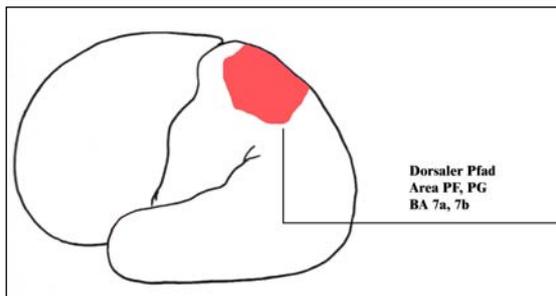


Abbildung 3.7: Lage der Areale des dorsalen Pfades (BA 7a, 7b); Maßgeblich beteiligt an: Lokalisation von Objekten im Raum („WO“-Pfad) (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)

3.3.1 Primärer auditiver Kortex (= Gyri temporales transversi)

Der primäre auditive Kortex (A1) umfasst das Brodmann-Areal (BA) 41 und ist für die integrations- und interpretationsfreie Bewusstwerdung von akustischen Impulsen aus dem Innenohr verantwortlich (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003). Für hörende Menschen ist dieses Areal bedeutend, um zunächst einmal alle Laute unterschiedlicher Frequenzen wahrzunehmen. Da Gehörlose im Gegensatz dazu keinen auditiven Input erfahren, ist dieses Hirnareal für uns von Interesse. Untersuchungen zu Aktivierungsmustern in A1 sollen klären, ob dieses Areal Aktivierungen aufweist, obwohl es keine adäquate Stimulation erfährt, und welche Erklärungen es für eventuell auftretende Aktivierungen eines deprivierten Areals gibt. Finney, Fine und Dobkins (2001) gelang mehrfach der Beweis, dass Gehörlose Aktivierungen im deprivierten Areal A1 zeigen, wenn ihnen visuelle Stimuli dargeboten werden. Diese kortikale Reorganisation zeigt, dass der primäre auditive Kortex eine außergewöhnliche Rolle für die Gehörlosen einnimmt, da bei Hörenden solche Plastizitätsprozesse bezüglich des A1 nicht in Gang gesetzt werden. In einer Untersuchung von MacSweeney et al. (2002a) wurden Hörenden, Gebärdensprachdolmetschern und Gehörlosen englische Sätze audio-visuell dargeboten (es wurde per Video eine sprechende Person gezeigt und das Gesagte über Kopfhörer eingespielt) bzw. von den Gebärdenden die Ausführung von Gebärdensprachsätzen verlangt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Aktivierungen in A1 von der Modalität der Sprache abhängig sind. Die klassischen Sprachareale, Broca und Wernicke, sind dagegen modalitätsunabhängige Strukturen. In der eben beschriebenen Studie erzeugte die audio-visuelle Sprache bei Hörenden stärkere Aktivierungen in A1 als die Gebärdensprache bei den Gehörlosen. Die Autoren vermuteten eine Spezialisierung der linken superioren temporalen auditiven Regionen für die Verarbeitung gesprochener Sprache auch bei hörenden Gebärdensprachnutzern. Nach Meinung der Autoren sind diese Areale für das Hören von Sprache zuständig. Durch die Abwesenheit von auditivem Input rekrutieren Gehörlose aber diese Regionen für die Verarbeitung visueller Stimuli. Die dennoch, wengleich geringen und trotz auditiver Deprivation vorhandenen Aktivierungen in A1 bei Gehörlosen erklären die Autoren damit, dass diese Areale für die Verarbeitung von Gebärdensprache genutzt werden (für die visuellen statt auditiven Informationen). In der geringeren A1-Aktivierung bei Gehörlosen zeigt sich die Modalitätsabhängigkeit der auditiven Areale (vgl. MacSweeney et al., 2002a).

Wie bereits beschrieben, wird der primäre auditive Kortex aufgrund seines besonderen Status in den Kapiteln 8 bis 11 gesondert behandelt. Dort sind alle bisherigen Forschungsergebnisse in Bezug auf A1 bei Gehörlosen ausführlicher dargestellt.

3.3.2 Sekundärer auditiver Kortex (= Gyrus temporalis superior)

Die gegenwärtige Literatur bezeichnet den sekundären auditiven Kortex unterschiedlich: A2 oder auch *Wernicke-Areal* (befindet sich im A2). Im Folgenden wird der sekundäre auditive Kortex als Synonym für das Wernicke-Areal verwendet. Dieses sensorische Sprachzentrum erhält überwiegend Afferenzen aus dem primären auditiven Kortex. Die akustischen Impulse werden hier interpretativ und integrativ verarbeitet. Das bedeutet, dass Geräusche als Wörter oder Melodien erkannt werden. Dieser Prozess setzt allerdings voraus, dass diese Klänge durch Erinnern zugeordnet werden können. Die dominante Hemisphäre ist dabei für das Verständnis von Sprache zuständig, wogegen die nicht-dominante Hemisphäre eher bei der Wahrnehmung von Musik eine Rolle spielt (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003).

Das Wernicke-Areal spielt für das Sprachverständnis eine entscheidende Rolle und gilt als klassisches Areal bei der Verarbeitung der eigenen Primärsprache bei Hörenden sowie Gehörlosen.

Neville et al. (1997) und Neville et al. (1998), sowie D'Hondt und Leybaert (2003) und Bavelier et al. (1998b) wiesen in zahlreichen Studien an gehörlosen und hörenden Kindern und Erwachsenen nach, dass die klassischen Sprachareale (u. a. Wernicke- und Broca-Areal) in der linken dominanten Hemisphäre auf die Verarbeitung von Sprache spezialisiert sind. Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob grammatikalische und semantische Kenntnisse gebärdend oder sprechend entwickelt wurden (vgl. Neville et al., 1997, 1998; Bavelier et al. 1998b; D'Hondt & Leybaert, 2003).

3.3.3 Broca-Areal (= motorisches Sprachareal)

Das Broca-Areal, welches von Brodmann mit den Nummern 44 und 45 beziffert wurde, gilt gegenüber dem sensorischen Sprachzentrum (Wernicke-Areal) als motorisches Sprachzentrum. Hier werden zunächst der Wortlaut und Satzbau von Sprache gebildet. Im Anschluss daran werden über verschiedene Schaltkreise, deren Erläuterung an dieser Stelle zu weit führen würde, diejenigen Muskeln initiiert, die für das Aussprechen von Worten

und die Mimik zuständig sind. Im Broca-Areal steht im Gegensatz zum Wernicke-Sprachzentrum nicht das Sprachverständnis, sondern die Realisierung der Vokalisierung im Vordergrund. Das Broca-Zentrum ist linksdominant lokalisiert und kann somit bei verletzungsbedingtem Ausfall in den meisten Fällen nicht kompensiert werden (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003). Obwohl Gehörlose nicht hörbar vokalisieren, sprechen sie beim Gebärden simultan lautlos mit. Folglich werden auch bei dieser Gruppe vom Broca-Areal aus (über den primären motorischen Kortex) die Gesichtsmuskeln koordiniert, die beim Sprechen beteiligt sind. Zum anderen ist das Broca-Areal für den mimischen Ausdruck verantwortlich, der in der Gebärdensprache eine zentrale und bedeutungstragende Rolle einnimmt.

Es wurde in zahlreichen Studien nachgewiesen, dass das Broca-Areal wesentlich an den modalitätsunabhängigen Aspekten der Sprachbeteiligung beteiligt ist (vgl. Ronnberg, Soderfeldt & Risberg, 2000; Klann, Kastrau, Keminy & Huber, 2002; Neville et al., 1998; Soderfeldt et al., 1997; MacSweeney et al., 2001).

3.3.4 Gyrus praecentralis (= Motokortex)

Das Brodmann-Areal 4 ist neben anderen Strukturen an der Programmierung von Willkürbewegungen beteiligt, wobei wie gesagt bei der Initiierung von Bewegungen noch weitere Strukturen involviert sind (z. B. Kleinhirn, Basalganglien). Der Motokortex ist durch eine somatotope Gliederung gekennzeichnet. Das bedeutet, dass die Neuronen, die bestimmte Körperteile ansteuern, systematisch gegliedert auf dem Motokortex abgebildet sind. Körperteile, für deren willkürliche Bewegung zahlreiche und fein differenzierte Muskeln notwendig sind, nehmen ein entsprechend großes Gebiet im Gyrus praecentralis ein (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003).

Im Gegensatz zur oral-auditiven Lautsprache wird die Gebärdensprache vorrangig in der manuellen Modalität realisiert. Jedes Wort wird durch komplexe Bewegungsabläufe der Hände, Arme, Finger, des Oberkörpers und des Mundes zum Ausdruck gebracht. Folglich haben Bewegungen im Zusammenhang mit Semantik einen hohen Stellenwert in der Gebärdensprache und für die Gehörlosen. Interessante Fragen sind in diesem Kontext, ob Gehörlose z. B. ein gelesenes Wort oder das Bild eines Alltagsobjektes automatisch in die entsprechende Gebärde dekodieren, oder ob visualisierte Gebärden zunächst internal von ihnen nachgeahmt werden müssen, bevor sie deren Bedeutung entschlüsseln können.

Stellen sich also Gehörlose beim Sehen von Bildern oder Worten die Bewegungen der entsprechenden Gebärde vor und führt das zu Aktivierungen im Gyrus praecentralis?

Dass der Motokortex in der von manuellen Handzeichen bestimmten Gebärdensprache auch bei der Wahrnehmung anderer Gebärdender eine wichtige Rolle einnimmt, zeigt unter anderem die Studie von Johnson-Frey et al. (2003). Sie fanden heraus, dass der Gyrus praecentralis auch dann aktiviert wird, wenn eine Person Abbildungen von Bewegungen einer anderen Person sieht. Die 18 Versuchspersonen, die mithilfe von fMRT getestet wurden, sahen statische Bilder von Werkzeugen und unbekanntem Objekten, die von einer rechten bzw. linken Hand gegriffen oder berührt wurden. Es wurde im Ergebnis von den betrachteten Arealen der Gyrus praecentralis bilateral am häufigsten aktiviert (vgl. Johnson-Frey et al., 2003).

3.3.5 Ventraler Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis)

Der Gyrus fusiformis umfasst die Brodmann-Areale 18, 19, 20, 36 und 37. Der Teil des Gyrus fusiformis, der den sekundären visuellen Kortex nicht mit einschließt, wird als ventraler Pfad (BA 20, 36, 37) bezeichnet. Über die ventrale Bahn wird die bewusste visuelle Wahrnehmung von Objekten vermittelt. Hier werden folglich Objekte identifiziert (z. B. Spinne, Haus, Auto) und deren Farbe und Form wahrgenommen (vgl. Milner & Goodale, 1993). Da beim Gebrauch von Gebärdensprachen die Wahrnehmung visueller Reize im Vordergrund steht und fortlaufend Formen, Objekte und deren Merkmale perzipiert werden müssen, um für das Verständnis notwendige Informationen zu filtern, ist diese Hirnstruktur ebenfalls bei der Verarbeitung gebärdensprachlicher Signale von Bedeutung.

Nakamura et al. (2004) wiesen durch ihre Studie indirekt die Bedeutung des ventralen Pfades bzw. des Gyrus fusiformis für die Gebärdensprache nach. Sie untersuchten mithilfe von MEG (= Magnetoenzephalografie) zwanzig Hörende, die keinen Kontakt zur Gebärdensprache hatten. Den Probanden wurden bedeutungsvolle (z. B. „Peace-Handzeichen“) und bedeutungslose Handzeichen sowie Bilder von Gesichtern dargeboten. Die Erkennung der Handzeichen aktivierte neben dem dorsalen Pfad (vgl. Abschnitt 3.3.6) und dem Okzipitallappen vor allem den ventralen Pfad. Hier wurde der überwiegende Teil der Aktivierungen in der rechten Hemisphäre gefunden, was die Autoren veranlasste, zu vermuten, dass die Erkennung von bekannten Handzeichen in ähnlicher Weise wie soziale Zeichen (z. B. Gesichtsausdrücke) verarbeitet wird. Die Bilder der Gesichter wurden

ebenfalls in ventralen Regionen verarbeitet (inklusive Gyrus fusiformis, temporalem Kortex und STS (= Sulcus temporalis superior)). Aktivierungen im ventralen Pfad in der linken Hemisphäre zeigen eher die semantische Repräsentation von dargebotenen Gesichtern und Handzeichen und deren sinnvolle Bedeutung in einem semantischen Kontext für den Wahrnehmenden (so zeigt z. B. ein Gesichtsausdruck mit aufgeblähten Backen für den Gehörlosen eine zusätzliche semantische Bedeutung an). Der ventrale Pfad spielt also nicht nur eine bedeutende Rolle als Objekt-Erkennungs-System, sondern auch bei der Wiedererkennung von Handzeichen, Gesichtern, sozialen Signalen, Gesichtsausdrücken und emotionaler Signalerkennung bei anderen Personen (vgl. Nakamura et al., 2004). Diese eben benannten Funktionen sind unabdingbar in der Interaktion zwischen zwei gebärdenden Personen. So müssen die Handformen der Gebärden erkannt und in einen semantischen Kontext überführt, sowie der Gesichtsausdruck richtig identifiziert werden, was die enorme Bedeutung des ventralen Pfades speziell für diese manuelle Sprachmodalität beweist.

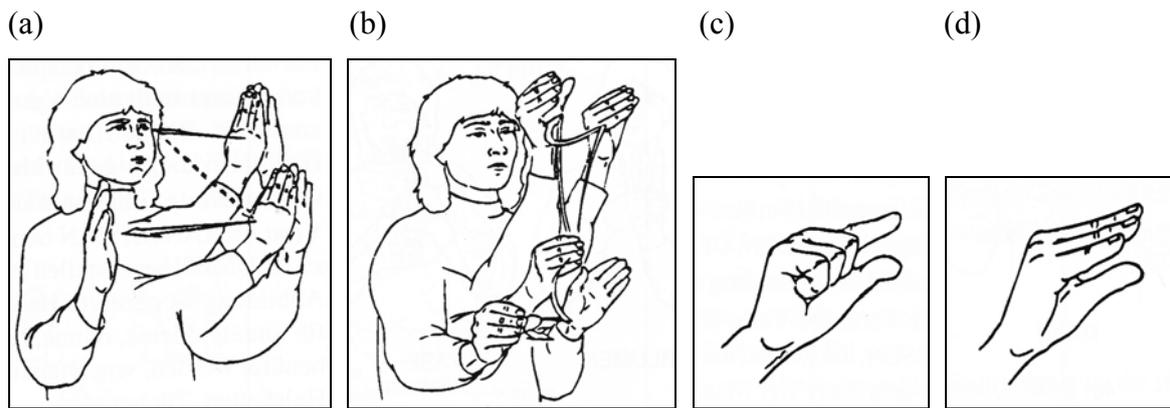
3.3.6 Dorsaler Pfad (= Teil des Parietallappens)

Der interessierende Teil des Parietallappens umfasst die Brodmann-Areale 7a und 7b und wird in der vorliegenden Arbeit als dorsaler Pfad bezeichnet. Hier werden sowohl Eigen- als auch Fremdbewegungen wahrgenommen. Außerdem spielt die dorsale Bahn eine Rolle bei der Kontrolle und Steuerung von Bewegungen im Raum, sowie bei der Erkennung von Winkeln und Handstellungen. Den Arealen 7a und 7b wird eine große Bedeutung bei der Raumorientierung und Bewegungsregulation beigemessen (vgl. Kolb & Whishaw, 1996). Detaillierte Informationen zum dorsalen Pfad sind in Kapitel 12 zu finden. Neben der in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Wichtigkeit für die Nutzung von Gebärdensprache, Formen von Objekten wahrzunehmen und richtig zuzuordnen, spielt die Wahrnehmung von Fremd- und Eigenbewegungen eine wahrscheinlich noch größere Rolle in der Gebärdensprachnutzung. Die Gebärdensprache ist zusätzlich zu ihrer visuellen Modalität hauptsächlich durch ihre manuellen Komponenten charakterisiert. Wie schon in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, wird Gebärdensprache hauptsächlich mit Bewegungen der Arme, Hände und Finger durchgeführt. Neben der motorischen Realisierung bei der Ausführung von Gebärdensprache, bei der der Gyrus praecentralis eine vordergründige Rolle spielt, ist eine korrekte Wahrnehmung der Bewegungsparameter des Gegenüber vonnöten, um dessen Gebärden zu verstehen. Stellungen der Hände im Raum, deren Wahrnehmung eine der

Funktionen des dorsalen Pfades ist, spielen eine wichtige Rolle in der Gebärdensprache. Rammel (1981) und Boyes Bream (1995) strukturierten die Gebärdensprache unter anderem dadurch, dass jede einzelne Gebärde durch folgende vier simultan auftretende Parameter identifiziert werden kann: *Handform*, *Ausführungsstelle*, *Handstellung* und *Tempo* (vgl. Rammel, 1981; Boyes Bream, 1995).

Die Stellung der Hände zueinander, sowie Handform und Positionierung der Hände im Raum, sind Strukturparameter jeder Gebärde und Merkmale, an deren Wahrnehmung die dorsale Bahn des Parietallappen maßgeblich beteiligt ist. Es ist zu erwarten, dass der dorsale Pfad für Wahrnehmung der manuellen Komponenten in der Gebärdensprache verantwortlich ist und folglich ebenfalls eine zentrale Rolle einnimmt, da Bewegungen in der Gebärdensprachausübung vordergründig sind.

Emmorey et al. (2002) untersuchten die Bedeutung des Parietallappens bei der Ausführung von Gebärdensprache, wenn räumliche Beziehungen explizit im Vordergrund standen. Damit Gehörlose räumliche Relationen zwischen zwei Objekten im Raum beschreiben können (z. B. „ein dickes Buch *in* ein Regal stellen“ oder „die Katze sitzt *unter* dem Tisch“), nutzen sie so genannte *Klassifikationsgebärden*. Um eine Klassifikationsgebärde anwenden zu können, müssen die zahlreichen Details der räumlichen Relation zwischen den Objekten analysiert werden, um dann die Hände in einer analogen Position im Gebärdenraum platzieren zu können. Dabei werden Eigenschaften der Objekte durch klassifizierende Handformen dargestellt (z. B. kleine, eckige Objekte oder Objekte mit breiter Oberfläche). Der räumliche Bezug zwischen den Objekten wird dagegen mit den eben genannten Klassifikationsgebärden (= KG) dargestellt (z. B. ein Buch *hineinstellen*; etwas *auf* den Tisch stellen) (vgl. Boyes Bream, 1995). Die Abbildung 3.8 zeigt beispielhaft klassifizierende Handformen und Klassifikationsgebärden.

**Abbildung 3.8:**

(a) KG + Verb: etwas Breites / Flaches + nebeneinander stellen; (b) KG + Verb: etwas Kleines / Eckiges + hineinstellen; (c) klassifizierende Handform für die Klasse der kleinen, eckigen Objekte; (d) klassifizierende Handform für die Klasse der kleinen, eckigen Gegenstände mit breiter Oberfläche (Quelle: Boyes Bream, S. 82, 83, 1995)

Emmorey et al. (2002) untersuchten mittels PET (= Positronen-Emissions-Tomografie) Gehörlose, deren Muttersprache die Amerikanische Gebärdensprache war (ASL = American Sign Language), und zeigten ihnen Bilder, auf denen der räumliche Bezug zwischen zwei Objekten zu sehen war (z. B. die Tasse steht *auf* dem Tisch). Aufgabe war es, dazu die entsprechenden Klassifikationsgebärden zu produzieren, die den räumlichen Sachverhalt darstellen. Als Kontrollaufgabe sollten die Objekte lediglich benannt werden. Die Produktion von Klassifikationsgebärden aktivierte den linken und rechten Parietallappen. Nach Vermutung der Autoren kommt dem rechten Parietalkortex dabei eher der Ausdruck der räumlichen Beziehungen in der Gebärdensprache zu, da der Gebärdenraum aktiv durch Bewegungen genutzt wird, um die räumlichen Bezüge darzustellen. Die rechte Hemisphäre des Parietallappens könnte also eine entscheidende Rolle bei der Produktion von räumlichen Beschreibungen in einer manuellen Sprache spielen und wäre folglich für die bewegungsrelevanten Komponenten verantwortlich. Außerdem ist der rechte superiore (obere) Parietallappen bei der Produktion von Klassifikationsgebärden nach Ansicht der Autoren aktiv, da dieser eine Rolle bei der sensomotorischen Integration von Bewegungen durch aktives Vorstellen spielt, und dies in der Folge zu einer internalen Repräsentation von Bewegungen des eigenen Körpers führt. Die linke Hemisphäre des parietalen Kortex ist dagegen vermutlich aktiv, da die Handformen der Klassifikationsgebärden zusätzlich auch Informationen über den Objekttyp verschlüsseln, z. B. „breite Oberfläche“ oder „kleiner quadratischer Gegenstand“ (vgl. Emmorey et al., 2002). MacSweeney et al. (2002) fanden vergleichbare Ergebnisse bei hörenden und gehörlosen Gebärdenden, denen sie topografische (z. B. die

Katze *sitzt auf* dem Stuhl) und nicht-topografische Sätze (z. B. Susi hat einen Bruder) in einer fMRT-Untersuchung darboten. Sowohl Emmorey et al. (2002) als auch MacSweeney et al. (2002) fanden zudem heraus, dass die audiovisuelle Darbietung räumlicher und nicht-räumlicher Bezüge bei Hörenden nicht zu parietalen Aktivierungen führte und die räumliche Beschreibung alltäglicher Gegenstände in der Lautsprache mittels Präpositionen nicht die Areale involvierte, die bei Gebärdensprachnutzern bei räumlichen Bezügen beansprucht wurden. Bei reiner Darbietung räumlicher Bezüge zeigten sich also keine Aktivierungen im parietalen Kortex der Hörenden, wogegen die Produktion von Präpositionen zu Aktivierungen in der linken Hemisphäre dieser Struktur führte (vg. Abschnitt 3.4). Das würde für die vorliegende Studie bedeuten, dass Stimuli, in denen räumliche Bezüge zwischen Objekten im Raum dargestellt sind, bei den Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern parietale Strukturen aktivieren müssten, wogegen diese Aktivierungen bei den Hörenden ausbleiben müssten. Wie schon erwähnt wird, aufgrund seiner besonderen Stellung, der dorsale Pfad mit seinen für die Gebärdensprachverarbeitung relevanten Funktionen und den Ergebnissen der vorliegenden Studie separat in den Kapiteln 12 bis 15 behandelt und diskutiert.

3.4 Neuronale Besonderheiten durch bilingualen Spracherwerb und -gebrauch

Da in den vorliegenden Untersuchungen die Gebärdensprachdolmetscher eine eigene Versuchsgruppe bildeten, soll an dieser Stelle auf deren Sonderstellung bezüglich der Sprache aufmerksam gemacht werden. Gebärdensprachdolmetscher lassen sich durch einen bilingualen Spracherwerb und -gebrauch kennzeichnen. Das bedeutet, dass sie sowohl die Lautsprache als auch die Gebärdensprache beherrschen. Alle im Folgenden als Bilinguale bezeichneten Personen beherrschen die (deutsche oder englische) Lautsprache sowie die (deutsche oder englische) Gebärdensprache.

In einer Untersuchung von Neville et al. (1998) mussten bilinguale Hörende dargebotene englische und gebärdete Sätze wahrnehmen, während der regionale, zerebrale Blutfluss mittels fMRT gemessen wurde. Die Ergebnisse wiesen eine hohe Beteiligung beider Hemisphären in den klassischen Spracharealen bei der Verarbeitung der Gebärdensprachsätze bei dieser Gruppe sowie auch bei den getesteten Gehörlosen auf. Folglich lassen sich diese Aktivierungen beider Hemisphären nicht auf die auditive Deprivation zurückführen, sondern auf den Gebrauch einer räumlich-visuellen Sprache.

Das Lesen englischer Sätze führte dagegen bei den gebärdenden Hörenden zu den klassischen Aktivierungen in der linken Hemisphäre. Der Bilingualismus und die damit verbundenen spezifischen Verarbeitungsanforderungen der Gebärdensprache verändern folglich teilweise die Organisation der Sprachsysteme im Gehirn (vgl. Neville et al., 1998). Neben Unterschieden in der Lateralisierung der Aktivierungen fanden Emmorey et al. (2005) und Damasio et al. (2001) bilaterale Aktivierungen im Parietalkortex, die durch den Bilingualismus hervorgerufen werden. Sie boten Bilingualen Zeichnungen dar, auf denen Objekte im räumlichen Kontext zu sehen waren, und forderten die Versuchspersonen auf, die entsprechende Klassifikationsgebärde und Präposition zu produzieren. Beide Aufgaben resultierten in einer bilateralen Aktivierung des parietalen Kortex. Im Gegensatz dazu kam es bei Hörenden ohne Gebärdensprachkenntnisse zu ausschließlich linksseitigen Aktivierungen im Parietalkortex, als diese Gruppe Präpositionen lautsprachlich produzieren musste. (vgl. Emmorey et al., 2005; Damasio et al., 2001). Die parietalen Aktivierungen in der rechten Hemisphäre bei Gehörlosen und Bilingualen werden demnach durch den lebenslangen Gebrauch einer räumlichen Sprache generiert. Der Gebrauch der Gebärdensprache erhöht bei Bilingualen kognitive räumliche Fähigkeiten, da die Analyse räumlicher Gegebenheiten einen wichtigeren Stellenwert einnimmt (vgl. Emmorey et al., 2005). Interessanterweise konnten Grosjean, Peng, Münte und Rodriguez-Fornells (2003) bei Bilingualen (hier: die untersuchten Gebärdensprachdolmetscher) auch Aktivierungen in der rechten Hemisphäre im parietalen Kortex bei der Produktion und dem Lesen von Lautsprache nachweisen. Es lässt sich vermuten, dass diese Hörenden die stete Verschlüsselung räumlicher Beziehungen der Gebärdensprache auch bei der Produktion der zweiten Sprache nicht „abschalten“ können, und sich diese erste Sprache auf die Sprachprozesse der zweiten auswirkt (vgl. Grosjean et al., 2003).

Aufgrund einer Studie von Newman, Bavelier, Corina, Jezzard und Neville (2002) soll an dieser Stelle auf ein Problem bezüglich der Aktivierungsmuster der Gebärdensprachdolmetscher-Gruppe hingewiesen werden. Newman et al. (2002) untersuchten 16 Hörende, die die Gebärdensprache von Geburt an gelernt hatten (native signer), und 11 Hörende, welche die Gebärdensprache erst nach der Pubertät erworben hatten. Es wurden geschriebene englische Sätze sowie gebärdete Sätze per Video dargeboten. Newman et al. (2002) interessierten sich vor allem für die Aktivierungen im Gyrus angularis. Der Gyrus angularis der linken Hemisphäre besitzt eine Disposition für die Verarbeitung linguistischer Prozesse, sowohl bei der Verarbeitung gesprochener als auch gebärdeter Sprache. Die rechte Hemisphäre des Gyrus angularis scheint dagegen auf

die Verarbeitung menschlicher Bewegungen und räumlicher Informationen, die der Semantik dienen, spezialisiert zu sein. Nach Durchführung der Tests zeigten sich bei den Gebärdensprach-Muttersprachlern (= native signer) Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre des Gyrus angularis. Die Personen, die ihre Gebärdensprachkenntnisse erst nach der Pubertät erwarben, wiesen dagegen nur Aktivierungen in der linken Hemisphäre auf. Die Autoren postulierten aufgrund der Ergebnisse eine kritische Phase für die Verarbeitung der Gebärdensprache in rechtshemisphärischen Strukturen. Ihrer Meinung nach nutzen die *native signer* den rechten Gyrus angularis für die räumlich-linguistische Verarbeitung von Gebärdensprache, was den spätlernenden Hörenden, deren Muttersprache die Lautsprache ist, verwehrt bleibt (vgl. Newman et al., 2002). Diese Ergebnisse beziehen sich auf Hörende, welche die Gebärdensprache neben der Lautsprache erlernt hatten, und auf den Gyrus angularis, der zwar afferent mit dem Wernicke-Zentrum verbunden ist, aber nicht Teil dieses Sprachareales ist. Folglich stehen die Ergebnisse dieser Studie nicht im Widerspruch zu den Studien, die bei spätlernenden Gehörlosen vorrangig bilaterale Aktivierungen im Wernicke-Areal fanden.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass es Unterschiede in den Aktivierungsmustern zwischen Gebärdenden, die die Gebärdensprache sehr früh, und solchen, die sie erst spät erlernt haben, gibt. Da die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher bezüglich des Zeitpunktes des Gebärdenspracherwerbes nicht homogen ist, sind vermutlich auch Unterschiede in den Aktivierungen zu erwarten. Allerdings konnten die Dolmetscher innerhalb der Gruppe aufgrund der geringen Gruppenstärke und den damit verbundenen methodischen Problemen nicht nach diesem Kriterium getrennt werden. Folglich müssen inkonsistente Ergebnisse unter diesem eben beschriebenen Gesichtspunkt betrachtet werden.

3.5 Worin besteht der Unterschied zwischen *Gebärden* und *Gesten*?

Da eine der sechs dargebotenen Kategorien allgemeingültige und verständliche *Gesten* waren, soll auf diese spezielle Kategorie im Folgenden genauer eingegangen werden, welche Unterschiede zur Kategorie *Gebärden* bestehen, und welche Areale für die Verarbeitung von Gesten verantwortlich sind.

Die ersten Philosophen bzw. Naturwissenschaftler, die eine Systematik für die Sprache als Zeichensystem aufstellten und nach deren Ansicht Dinge und Zeichen / Gebärden / Gesten

willkürlich verbindbar sind, waren Descartes (1598-1650) und Abbé de l'Épée (1712-1789) (vgl. Nöth, 1992). Somit strukturierten diese beiden Philosophen die Sprache im Ansatz.

Zahlreiche Literaturangaben machen divergente Angaben darüber, ob Gesten respektive Gebärden getrennt von der Sprache zu betrachten sind, oder ob Sprache gestenartig ist. Zudem wird häufig diskutiert, inwiefern der Gesichtsausdruck in die Definition von Gebärden und Gesten mit einbezogen werden muss, oder ob Gesten und Gebärden nur durch die Aktivität der oberen Extremitäten gekennzeichnet sind (vgl. Armstrong, Stokoe & Wilcox, 1995).

Nach Nöth (1992) versteht man heute unter Gebärden konventionelle Handzeichen als Bedeutungsträger (Übermittlung von Informationen), die analog zu Worten in der Lautsprache gelten. Gebärden müssen erlernt werden und werden nur innerhalb derer Personenkreise verstanden, die ebenfalls Gebärdenkenntnisse erworben haben. Gebärden lassen sich in einzelne Komponenten zerlegen und sind Träger grammatikalischer Bedeutungen. Sie werden vorrangig mit den Händen, in Verbindung mit Mimik, Mundbild und im Kontext mit der Körperhaltung gebildet, und dienen der nonverbalen Kommunikation (vgl. Nöth, 1992).

Gesten dagegen sind internationale, nicht aus Komponenten bestehende, symbolische Strukturen: jede Geste präsentiert eine einzelne Bedeutung und dient ebenfalls der nonverbalen Kommunikation. Gesten müssen zwar ebenfalls erlernt werden, werden aber im Gegensatz zu Gebärden von Hörenden und Gehörlosen sowie zwischen verschiedenen Kulturkreisen verstanden. Ausnahmen bilden kulturspezifische Gesten (z. B. das Kopfschütteln als Zustimmung bei der indischen Kultur). Gesten können in deiktische (hinweisend, zeigend), ikonische (bildhaft, anschaulich) und lexikalisierte (z. B. Daumen und Zeigefinger reiben, um „Geld“ anzudeuten) Gesten unterteilt werden, wobei hier bezüglich dieser Untersuchung die letztgenannte Form interessiert (vgl. Armstrong et al., 1995).

Anhand der Merkmale von Gesten und Gebärden ist erkennbar, dass zwar beide Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede aufweisen. Für die hier vorliegende Untersuchung von Interesse ist die Frage, ob es vergleichbare neuronale Muster bei der Verarbeitung von Gebärden durch Gehörlose und Gesten durch Hörende gibt. Diese Vermutung liegt nahe, da beide Kategorien durch die gleiche Modalität übertragen werden (visuell-manuell) und so im Kontrast zu dem gehörten Wort stehen. Außerdem ist von Interesse, welche Unterschiede Gehörlose in der Verarbeitung von den ihnen

verständlichen Gesten und Gebärden zeigen, und wie Hörende die ihnen fremden Gebärden im Gegensatz zu den ihnen bekannten Gesten verarbeiten.

3.5.1 Einordnung des Begriffes „Gesten“

Kontrovers zu den Ansichten von McNeill (1992) und Burling (1993), die Gesten und Sprache aufgrund der fehlenden hierarchischen Struktur der Gesten als nicht miteinander vergleichbar erachteten, postulierte Greenfield (1991) das Gegenteil. Seinen Beobachtungen an Schimpansen und Kindern bezüglich ihres Umganges mit Werkzeug zufolge, unterstützte er folgende Behauptung: es gibt eine deutliche Beziehung zwischen der hierarchisch-organisierten Struktur der Sprache und der Objektkombinierung mit den Händen. Nach seiner und der Meinung anderer Autoren sind Schaltkreise im linken Frontallappen sowie das Broca-Areal die kortikale Grundlage für die hierarchische Organisation von Gesten und manueller Objektkombination. Als Ursprung für die vergleichbare ontogenetische Entwicklung von Sprache und den Umgang mit Objekten wird das Broca-Areal vermutet. Da das Wesen von Gesten intermodal (motorisch, perzeptual, kinästhetisch) ist, wird sicher nicht ein einzelnes Areal für die Verarbeitung dieser Kategorie beansprucht. Nach Deane (1991) ist aber der inferiore Parietallappen, welcher außerdem diese verschiedenen Modalitäten integriert, verantwortlich für die grammatikalische Kompetenz von Sprache.

3.5.2 Welche neuronalen Korrelate hängen mit der Verarbeitung von Gesten zusammen?

Eine Untersuchung mit Gesten führten Hermsdörfer et al. (2001) durch. Im Vordergrund des Interesses standen die kortikalen Beziehungen und zerebralen Mechanismen, die der Nachahmung von bedeutungslosen Handbewegungen (gestenähnlich) unterliegen. Hermsdörfer et al. (2001) boten sieben Rechtshändern statische, gepaarte Gestenbilder mit verschiedenen bedeutungslosen Hand- und Fingerhaltungen dar. Die Probanden sollten entscheiden, ob es sich um identische oder verschiedene Bilder handelte. Als Kontrollbedingung sollte angegeben werden, ob die Person auf den gepaarten Bildern die Gleiche war. Die Versuchspersonen mussten folglich die Hand- und Fingerstellungen auf den Bildern diskriminieren. Die Ergebnisse bewiesen die linkshemisphärische Dominanz für die Verarbeitung der Handgesten und die Involvierung des parietalen Kortex, der

visuellen Assoziationskortex und des dorsalen Pfades. Dieses Netzwerk verschiedener Areale reflektiert nach Ansicht der Autoren das Netzwerk, welches für die reale Ausführung solcher Gesten beansprucht wird. Bei der Diskriminierung der Fingergesten zeigten sich vergleichbare Aktivierungen zu den Handgesten. Allerdings wiesen die Ergebnisse zusätzliche bilaterale Aktivierungen auf, die vermutlich aus einer präziseren räumlichen Analyse resultierten. Zusammengefasst ist bei der Wahrnehmung bedeutungsloser Gesten ein linksdominantes Netzwerk aktiv, das auch eine entscheidende Rolle bei der Ausführung solcher Gesten spielt (vgl. Hermsdörfer et al., 2001). Die linkshemisphärischen Aktivierungen bei Gestenverarbeitung lassen sich vermutlich damit erklären, dass auch bei dieser Aufgabe Informationen über den Objekttyp entschlüsselt werden müssen (Handhaltung). Die Informationen zu Objekttypen und –klassen wurden auch schon in der Untersuchung von Emmorey et al. (2002) der linken Hemisphäre zugeschrieben (vgl. Abschnitt 3.3.6).

Aufgrund des eben aufgeführten intermodalen Wesens von Gesten interessiert die Klärung der Fragen, in welchen Arealen Gehörlose und Hörende Gesten verarbeiten, und ob sich diese beiden Gruppen hinsichtlich der Verarbeitung von Gesten unterscheiden.

Im folgenden Abschnitt werden die Hypothesen formuliert, die sich bezüglich verschiedener Hirnareale aus den bis hierher beschriebenen Besonderheiten der Gebärdensprache für Gebärdensprachnutzer ergeben. Dadurch entstehen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den hörenden Kontrollgruppen. Die Hypothesen bezüglich der hier untersuchten vier Gruppen (Gehörlose, Gebärdensprachdolmetscher, Kontrollgruppe 1, Kontrollgruppe 2) zu den Arealen Broca, Wernicke, ventraler Pfad und Gyrus praecentralis sind im folgenden Kapitel 4 nachzulesen.

4 Hypothesen des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis

Im Folgenden werden die Hypothesen bezüglich der Aktivierungsmuster in den festgelegten Regions of interest (= ROI) *Wernicke-Areal*, *Broca-Areal*, *ventraler Pfad* und *Gyrus praecentralis* getrennt formuliert.

4.1 Hypothesen zum Wernicke-Areal

Im Mittelpunkt des Interesses der vorliegenden Arbeit steht die Modalitätsspezifität der sprachdominanten Hemisphäre. Es sollen Vergleiche zwischen hörenden und auditiv-deprivierten Menschen angestellt werden, um zu klären, inwiefern sprachliche Funktionen modalitätsspezifisch (modalitätsabhängig) oder supramodal (modalitätsunabhängig) organisiert sind.

Das Wernicke-Areal gilt als klassisches Sprachareal zur Verarbeitung lexikalischer und semantischer Aspekte von Sprache. Bei Gehörlosen und hörenden Probanden spielen zwei unterschiedliche Sprachmodalitäten bezüglich der Verarbeitung ihrer Muttersprache eine Rolle: die oral-auditive Lautsprache und die visuell-manuelle Gebärdensprache. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse zahlreicher Studien von Interesse, in denen nachgewiesen wurde, dass das Wernicke-Areal modalitätsunabhängig aktiviert wird und somit die Aufgabe des Sprachverständnisses sowohl bei Hörenden als auch bei Gehörlosen übernimmt (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991).

Obwohl es in der Literatur häufig divergente Aussagen zur zeitlichen Abfolge der Beteiligung der Sprachareale am Sprachverarbeitungsprozess gibt, werden einige Sprachareale, die an der Sprachwahrnehmung und Produktion beteiligt sind, konsistent beschrieben. Beim Lesen eines geschriebenen Wortes (visuell) sowie dem Hören eines Wortes (akustisch) kommt es zu Aktivierungen im posterioren Anteil des Sulcus temporalis superior, wo die Wortbedeutung des Wahrgenommenen entschlüsselt wird. Nach der Artikulationsplanung findet dann im inferioren präfrontalen Kortex die Sprachproduktion statt (vgl. Pritzel, Brand & Markowitsch, 2003). Inzwischen ist auch bekannt, dass die Darbietung unsinniger Stimuli (z. B. einzelne Buchstaben) nur Aktivierungen im Broca-Areal hervorrufen und nicht im Wernicke-Areal (vgl. Carlson,

2004). Obwohl für die Gehörlosen im Fall dieser Studie neben dem Leseprozess auch das Sehen von Gebärden (Abbildungen mit semantischer Bedeutung) stattfindet, wird dennoch der gleiche Verarbeitungsprozess wie beim Lesen angenommen. Es wird folglich für alle Gruppen bezüglich des Wernicke-Areals Aktivierungen bei den Kategorien (genaueres zu den Kategorien siehe Kapitel 5.3) erwartet, die von der jeweiligen Gruppe semantisch dekodierbar sind. So sollten Gebärdensprachdolmetscher und Gehörlose Aktivierungen im Wernicke-Areal auf alle Kategorien bis auf *Gebärden ohne Pfeil* zeigen. Für die Kontrollgruppen werden keine Aktivierungen bezüglich der Kategorien *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch* erwartet.

Aufgrund der eben dargestellten Erkenntnisse wird folgende gerichtete Hypothese aufgestellt:

Hypothese 1: *Alle Versuchspersonen zeigen für die Kategorien, die sie semantisch dekodieren können, Aktivierungen im Wernicke-Areal. Diese Aktivierungen sind unabhängig von der Modalität ihrer Muttersprache.*

Neben der eben beschriebenen Fragestellung interessieren die Lateralisierungsmuster der Aktivierungen für die vier Probandengruppen. Neville et al. (1998) und Bavelier et al. (1998b) konnten anhand von fMRT-Untersuchungen an Gehörlosen und hörenden Gebärdenden nachweisen, dass bei diesen Gruppen die klassischen Sprachareale in beiden Hemisphären an der Verarbeitung von Sprache beteiligt sind. Der Gebrauch einer visuell-räumlichen Sprache führt folglich zum Verlust der klassischen linkshemisphärischen Asymmetrie bei der Verarbeitung von Sprache, wie sie für die Hörenden der Fall ist.

Deswegen wird folgende gerichtete Hypothese postuliert:

Hypothese 2: *Die Gruppen Gehörlose und Gebärdensprachdolmetscher weisen bei der Verarbeitung der dargebotenen Stimuli ein bilaterales Aktivierungsmuster in den klassischen Spracharealen auf.
Die hörenden Kontrollgruppen 1 und 2 zeigen dagegen die klassische linkshemisphärische Asymmetrie bei der Sprachverarbeitung.*

4.2 Hypothesen zum Broca-Areal

Das Broca-Areal dient unter anderem der Sprachproduktion und besitzt, analog zum Wernicke-Areal, modalitätsunabhängige Funktionen. Beide Hirnstrukturen zählen zu den klassischen Spracharealen (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991). Es wird angenommen, dass der Prozess der Sprachproduktion durch internes Verbalisieren (inneres Vorsprechen des Wortes) beim Verstehen eines Wortes aktiviert wird. Welche Kategorien von welcher Gruppe laut der formulierten a priori-Annahme verstanden wurden, ist in Abschnitt 4.1 bereits beschrieben. Folgende gerichtete Hypothese wird in Bezug auf die Aktivierungen im Broca-Areal aufgestellt:

***Hypothese 3:** Alle Versuchspersonen zeigen für alle dargebotenen Kategorien, die sie semantisch dekodieren können, Aktivierungen im Broca-Areal. Diese Aktivierungen sind unabhängig von der Modalität ihrer Muttersprache.*

Da das Broca-Areal neben dem Wernicke-Areal zu den klassischen Hirnstrukturen bei der Sprachverarbeitung gilt, werden bezüglich der Hemisphären die Lateralisierungsmuster postuliert, wie bereits in Abschnitt 4.1 formuliert:

***Hypothese 4:** Die Gruppen Gehörlose und Gebärdensprachdolmetscher weisen bei der Verarbeitung der dargebotenen Stimuli ein bilaterales Aktivierungsmuster in den klassischen Spracharealen auf. Die hörenden Kontrollgruppen 1 und 2 zeigen dagegen die klassische linkshemisphärische Asymmetrie bei der Sprachverarbeitung.*

4.3 Hypothesen zum ventralen Pfad

Der ventrale Pfad (Teil des Gyrus fusiformis) erfüllt Funktionen bezüglich der Objektdiskriminierung. In diesem Zusammenhang werden alle relevanten Informationen bezüglich des dargebotenen Stimulus wahrgenommen, die der Identifikation des Objektes dienen. So werden z. B. Farbe und Form perzipiert (vgl. Milner & Goodale, 1993). Ebenso wichtig bei Gebärdensprach-Nutzern ist die Verarbeitung von Informationen über bekannte Handzeichen, Gesichtsausdrücke und soziale Zeichen, welche ebenfalls im ventralen Pfad

geschieht. An der Diskriminierung von Objekten ist der ventrale Pfad unabhängig davon beteiligt, ob die wahrnehmende Person hörend oder gehörlos ist. Ebenso sind diese Aktivierungen unabhängig davon, ob der diskriminierte Gegenstand semantisch dekodierbar ist (z. B. Bild eines Balles) oder nicht (z. B. unbekannte Handzeichen von einer Person dargestellt). Die Verarbeitung komplexer, visueller Informationen erfolgt bei allen Personen bilateral im ventralen Pfad. Diese bilateralen Aktivierungsmuster stehen im Gegensatz zu den linksdominanten Aktivierungen in den klassischen Spracharealen. Zu den bilateralen Aktivierungen wurde mit Untersuchungen an hörenden und gehörlosen Probanden und der Darbietung von Bildern mit Gesichtern mehrfach nachgewiesen, dass zwar beide Gruppen starke Aktivierungen in beiden Hemisphären im ventralen Pfad zeigten, sich aber bei den Gehörlosen dennoch eine Dominanz der sprachdominanten, linken Hemisphäre zeigte (vgl. Hypothese 6). Die Autoren führten die Aktivierungen in der rechten Hemisphäre auf die Diskriminierung nicht-sprachlicher und sozialer Signal-Informationen zurück, wogegen die linke Hemisphäre bei den Gehörlosen stärker aktiviert wurde, da sie den Gesichtsausdrücken semantische Informationen entnehmen konnten (vgl. McCullough, Emmorey & Sereno, 2005).

Für die Verarbeitung des hier dargebotenen Stimulusmaterials werden deswegen folgende gerichtete Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 5: *Alle Versuchspersonen zeigen auf alle sechs dargebotenen Kategorien starke bilaterale Aktivierungen im ventralen Pfad.*

Die zweite Hypothese bezieht sich auf die Aktivierungen in der sprachdominanten, linken Hemisphäre:

Hypothese 6: *Für die Gruppen Gehörlose und Gebärdensprachdolmetscher wird eine erkennbare Dominanz der linken, sprachdominanten Hemisphäre bei der Verarbeitung der Kategorien bezüglich des ventralen Pfades erwartet, die für diese beiden Gruppen semantisch dekodierbar sind. Die Kontrollgruppen 1 und 2 zeigen dagegen diese Überlegenheit der linken Hemisphäre nur bei den für sie semantisch dekodierbaren Kategorien „Objekte“, „Wörter“ und „Gesten“.*

4.4 Hypothesen zum Gyrus praecentralis

Der Gyrus praecentralis gilt, neben anderen Strukturen, als Ursprungsort von Willkürbewegungen. Folglich wird dieses somatotop organisierte Areal aktiviert, wenn Bewegungen der Arme, Hände, Zunge oder Lippen ausgeführt werden. Die Bedeutung dieses Areals bei der Ausführung der manuellen Gebärdensprache liegt auf der Hand. Zahlreiche Studien konnten nachweisen, dass der Gyrus praecentralis auch aktiviert wird, wenn eine Person einer anderen bei der Ausführung von Bewegungen zuschaut. Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob die Bewegungen statisch-passiv (einzelne Bilder) oder dynamisch-aktiv (Videosequenzen) dargeboten wurden (vgl. Aziz-Zadeh, Maeda, Zaidel, Mazziotta & Iacoboni, 2002; Johnson-Frey et al., 2003). Die Ergebnisse machen deutlich, dass der motorische Kortex eine wichtige Rolle bei der internalen Repräsentation von Bewegungen spielt.

In Bezug auf die Hypothesenbildung zum Gyrus praecentralis wird zwischen den Gruppen unterschieden, die die Gebärdensprache beherrschen und denen, die keinen Kontakt zur Gebärdensprache haben.

Die hörenden, nicht gebärdenden Kontrollgruppen sollen Aktivierungen im Motokortex auf die Stimuli aufweisen, die Bewegungen andeuten oder zeigen, auch wenn es statische Bilder sind. Nach Angaben der oben aufgeführten Autoren müsste der Gyrus praecentralis aktiviert werden, wenn Hörende die Personen sehen, die Gebärden ausführen.

Es wird folgende gerichtete Hypothese aufgestellt:

***Hypothese 7:** Die Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2 zeigen Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei den Kategorien, die Bewegungen durch andere Personen statisch darstellen. Das betrifft die Kategorien „Gesten“, „Gebärden mit Pfeil“, „Gebärden ohne Pfeil“ und „Gebärden statisch“.*

Diese Hypothese kann nicht in Bezug auf die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher aufgestellt werden. Den Erwartungen zufolge dekodieren diese beiden Gruppen jegliche dargebotenen Gebärdenbilder in das entsprechende Wort im Gegensatz zu den Kontrollgruppen, die dazu aufgrund fehlender Gebärdensprachkompetenz nicht in der Lage sind. Dagegen werden vermutlich dargebotene Wörter und Alltagsgegenstände von den Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern internal in die entsprechende Gebärde überführt. Folglich müssten sich dort, im Gegensatz zu den Kontrollgruppen,

Aktivierungen im Motokortex nachweisen lassen, was zu folgender gerichteter Hypothese führt:

Hypothese 8: *Im Gegensatz zu den beiden Kontrollgruppen weisen die Gruppen Gehörlose und Gebärdensprachdolmetscher Aktivierungen im Gyrus praecentralis für die Kategorien „Wörter“ und „Objekte“ gegen die Baseline auf.*

5 Methode

5.1 Physikalische und neurobiologische Grundlagen zum Messverfahren

In den nächsten Abschnitten wird die für diese Untersuchung verwendete Methode vorgestellt.

5.1.1 Grundprinzip der Magnet-Resonanz-Tomografie (MRT)

Das Grundprinzip der MRT (= Magnetresonanztomografie), welches Bloch, Hansen und Packard (1946) und Purcell, Torrey und Pound (1946) erstmals als Magnetresonanz-Phänomen beschrieben, beruht auf der Magnetisierbarkeit des menschlichen Körpers (vgl. Bloch et. al., 1946; Purcell et al., 1946). Zur Erzeugung von Magnetresonanz (MR)-Bildern werden die Kerne von Wasserstoffatomen (H^+) verwendet, welche neben ihrer Eigenschaft, das größte magnetische Moment aufzuweisen, auch das mit Abstand am häufigsten vorkommende Element im menschlichen Körper darstellen. Der menschliche Körper besteht zu 70% aus Wasser, wobei in jedem Tropfen 10^{24} Wasserstoffkerne vorkommen (vgl. Schild, 1990). Diese Atomkerne besitzen eine für das MRT entscheidende physikalische Eigenschaft: den Spin. Darunter versteht man den Eigendrehimpuls von Atomkernen um ihre Längsachse (Präzession). Dieser Eigendrehimpuls bewirkt ein kleines magnetisches Dipolmoment. Außerhalb eines Magnetfeldes präzedieren die Protonen frei und ungerichtet. Bringt man den menschlichen Körper in ein induziertes Magnetfeld (Scanner), richten sich die Dipolmomente vorzugsweise parallel zur Feldrichtung (z-Achse) aus. Die Präzessionsfrequenz der Spins um die Feldrichtung in dem induzierten Magnetfeld heißt Larmorfrequenz. Diese ist proportional zur Stärke des äußeren angelegten Magnetfeldes. Im MRT wird der Gleichgewichtszustand der Protonen nun durch Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses senkrecht zum statischen Magnetfeld gestört. Der Hochfrequenzimpuls bewirkt eine elektromagnetische Anregung, die sofort die Ausrichtung der vorher parallel-gerichteten Spins verändert. Die Protonen werden durch den Hochfrequenzimpuls in die xy-Ebene ausgelenkt. Nach Abschalten des Impulses relaxieren die Protonen in ihren ursprünglichen

Zustand zurück (z-Achse). Dabei geben sie die von ihnen absorbierte Energie wieder an die Umgebung ab, wobei diese Energieabgabe als Magnetresonanz-Signal gemessen werden kann. Die transversale Magnetisierung in der xy-Ebene wird kleiner, wobei das MR-Signal sinkt. Dabei steigt die Längsmagnetisierung in der z-Achse. Diese beiden Prozesse laufen parallel und voneinander unabhängig ab. Dem Anstieg der Längsmagnetisierung liegt die *longitudinale Relaxation T1* zugrunde. Grundlage der Abnahme der transversalen Magnetisierung ist die *transversale Relaxation T2*. Der Vorgang der longitudinalen Relaxation T1 ist mit Abgabe der Energie an die Umgebung verbunden. Die transversale Relaxation T2 ist durch einen Energietransfer zwischen benachbarten Protonen charakterisiert: im ursprünglichen Zustand sind die Protonen dephasiert. Nach der Anregung durch den Hochfrequenzimpuls präzedieren alle Spins synchron. Das bedeutet, dass sie alle „in Phase“ sind und somit eine Phase von 0° besitzen. Bei Wegfall des Radiofrequenz-Impulses (= RF-Impuls) dephasieren die Protonen erneut, wobei der eben beschriebene Energieaustausch zwischen den Protonen stattfindet und die transversale Magnetisierung abnimmt.

Da Protonen in einem flüssigen Milieu Energie an benachbarte Protonen schwerer abgeben können als in einem festen Milieu, besitzt z. B. Liquor eine lange T1 und T2, wogegen Fett eine vergleichsweise kurze T1 und T2 aufweist. Dabei entspricht die dunkle Darstellung einem schwachen Signal; die helle Darstellung dagegen einem starken Signal. Tabelle 5.1 fasst die wichtigsten Signalintensitäten verschiedener Gewebe zusammen.

Tabelle 5.1: Signalintensitäten verschiedener Gewebe bei T1- und T2-gewichteten Bildern (Quelle: modifizierte Tabelle aus Weishaupt, Köchli & Marincek, S. 16, 2001)

Gewebe	im T1-gewichteten Bild	im T2-gewichteten Bild
Fett	hell	hell
Wässrige Flüssigkeit	dunkel	hell
Tumor	dunkel	hell
Entzündung	dunkel	hell
Muskel	dunkel	dunkel
Bindegewebe	dunkel	dunkel
Hämatom akut	dunkel	dunkel
Hämatom subakut	hell	hell
Kompakta des Knochens	dunkel	dunkel
Luft	kein Signal	kein Signal

Neben den oben aufgeführten Eigenschaften der Protonen stehen noch zwei technische Faktoren im Zusammenhang mit dem entstehenden Bildkontrast. Zum einen die

Repetitionszeit (TR), zum anderen die Echozeit (TE). Die Repetitionszeit beschreibt die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Anregungen der gleichen Schicht. Um ein MR-Bild zu erhalten, muss jede einzelne Schicht mehrfach nacheinander mit dem oben beschriebenen Hochfrequenzimpuls angeregt und gemessen werden. Die Echozeit hat ebenfalls Einfluss auf die Bildqualität und charakterisiert die Zeitspanne von der Anregung einer Schicht bis zur Messung des MR-Signals.

Bei einer kurzen TR und TE (Richtwerte: TR $\sim < 500$ ms; TE $\sim < 30$ ms) ist die Rede von einem T1-gewichteten Bild (Wasser = dunkel). Dem gegenüber erhält man ein T2-gewichtetes Bild (Wasser = hell), wenn die TR und TE lang ist (Richtwerte: TR $\sim > 1500$ ms; TE $\sim > 80$ ms) (vgl. Schild, 1990). In der Abbildung 5.1 ist der Unterschied eines T1- und T2-gewichteten Bildes am Beispiel eines transversalen Gehirnschnittes zu sehen.

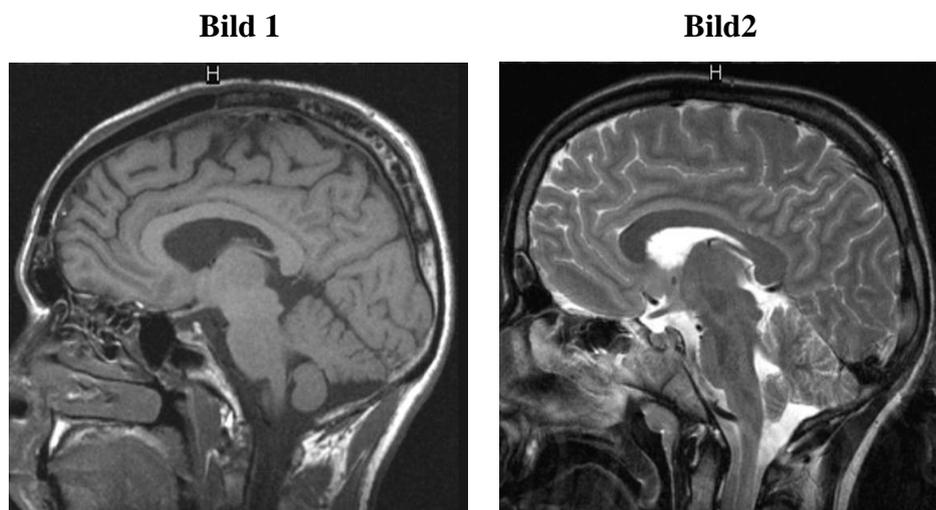


Abbildung 5.1: **Bild 1** Darstellung eines T1-gewichteten Bildes (TR 450ms / TE 14ms); **Bild 2** Darstellung eines T2-gewichteten Bildes (TR 5000ms / TE 99ms) (Abbildungen aus durchgeführten Messungen entnommen)

Im Gegensatz zur funktionellen MRT steht bei einem MR-Bild die Aufnahme der anatomischen Strukturen im Vordergrund. Messungen werden aus diesem Grund mit hoher Auflösung ($1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$) bei langer Aufnahmedauer durchgeführt und sind in der Regel T1-gewichtet. Funktionelle Bilder sind dagegen oft T2*-gewichtet und durch eine geringe Auflösung ($3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$) gekennzeichnet. Durch eine T2*-Aufnahme wird die Aufnahmezeit verkürzt, auch wenn die Auflösung dadurch an Qualität einbüßt. Der Vorteil dieser Aufnahme liegt dann folglich in der sehr schnellen Akquisitionszeit. Abbildung 5.2 zeigt sehr deutlich den Unterschied zwischen einem hochauflösenden T1-gewichteten und einem T2*-gewichteten Bild mit niedriger Auflösung.

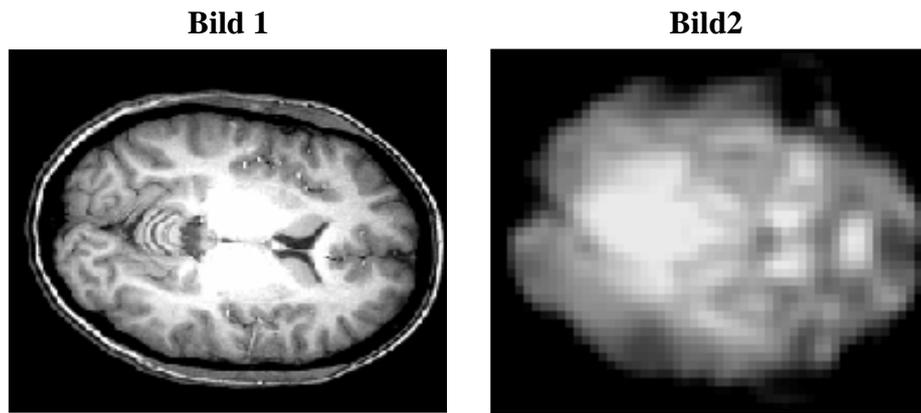


Abbildung 5.2: **Bild 1** anatomisches MRT-Bild (high resolution; 1mm Schichtdicke); **Bild 2** funktionelles MRT-Bild (low resolution; 3mm Schichtdicke) (Quelle: Internetadresse I, Culham, 2004)

5.1.2 Weiterverarbeitung des MR-Signals

Bei den oben beschriebenen Relaxationsvorgängen senden die Protonen Hochfrequenzstrahlungen (im Megahertzbereich) in Form von elektromagnetischen Schwingungen aus. Diese werden von einer Spule empfangen, welche zuvor den Hochfrequenzimpuls zur Auslenkung der Protonen gesendet hat. Die Schwingungen werden von der Spule an einen Computer weitergeleitet. Ohne räumliche Aufschlüsselung wäre der erhaltene Wert lediglich ein Maß für die Dichte der Protonen im Körper. Mithilfe von zusätzlich angebrachten Gradientenspulen ist es möglich, die MR-Sequenzen räumlich zu decodieren. Die Gradienten bewirken unterschiedliche Magnetfeldstärken aller räumlichen Punkte im Körper entlang der Gradienten. Die Resonanzfrequenzen der Protonen wiederum sind linear abhängig von der Magnetfeldstärke. Als direkte Folgen ergeben sich unterschiedliche Larmofrequenzen der Protonen. Sie können somit entsprechend verschiedene Resonanzfrequenzen ansprechen. Infolgedessen erhält man ein Summensignal aller Protonen einer Schicht. Durch das mathematische Verfahren der Fast Fourier Transformation ist es möglich, die Verteilung der Protonendichte innerhalb einer Schicht zu bestimmen, das Signal nach Zeilen und Spalten zu decodieren und somit ein zwei- oder dreidimensionales Schichtbild abzubilden. Lauterbur gelang es 1973 zuerst, den Resonanzsignalen räumliche Koordinaten zuzuordnen (vgl. Lauterbur, 1973). Üblicherweise besteht ein MR-Bild heute aus 512×512 oder 256×256 Bildpunkten. Jeder Bildpunkt bildet den Relaxationsgrad der Magnetisierung eines Volumenelementes (Voxel = 1mm^3) ab. Am Ende der Verarbeitung eines MR-Signals wird dem endgültigen Messwert auf dem Monitor ein Grauwert zugeordnet. Gewebe, in dem die H^+ schnell im

Volumenelement relaxieren, kann z. B. auf dem Monitor hell eingefärbt werden. Relaxieren die H^+ im Gewebe langsam, wird es als dunkle Fläche dargestellt. Diese unterschiedlichen Relaxationsfähigkeiten einzelner Gewebe werden zur Kontrastierung in der Bildgebung ausgenutzt.

5.1.3 Echo-Planar-Imaging Methode (EPI)

Zur Verbesserung der örtlichen und zeitlichen Auflösung in der funktionellen Bildgebung sind Echoplanare Sequenzen besonders gut geeignet, da ihr Vorteil in der sehr schnellen Akquisitionszeit (50 - 100 ms) liegt (vgl. Stehling, Turner & Mansfield, 1991). Mittels EPI-Methode werden Bilder nach nur einem Hochfrequenzimpuls ausgelesen. Durch wiederholtes Hin- und Herschalten der Frequenzgradienten, die für die Ortskodierung notwendig sind, wird ein Echo erzeugt. Die sehr schnelle Aufnahmezeit verringert das Auftreten von Bewegungsartefakten und wirkt sich somit positiv auf die Bildqualität aus. Durch Wegfall des in einer Aufnahme üblicherweise verwendeten 180° -Impulses und der zusätzlichen Gradientenecho-Sequenz, basiert EPI (= Echo planar imaging) auf Gradientenecho und nicht auf Spinecho. Der daraus folgende Nachteil ist der fehlende Ausgleich von Feldinhomogenitäten und ein $T2^*$ -Signalabfall (vgl. Weishaupt et al., 2001).

5.1.4 Grundprinzip der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomografie (fMRT)

Die Neuronen des menschlichen Zentralnervensystems tauschen untereinander elektrische Signale aus. Dieser Prozess geht mit Depolarisation und dem Wiederaufbau des Membranpotentials einher. Der Metabolismus im Nervengewebe bewirkt einen vermehrten Verbrauch von Energie und Sauerstoff, welche aus dem Blut der naheliegenden Kapillaren bezogen werden. Seit Roy & Sherrington (1890) ist bekannt, dass erhöhte Aktivität von Neuronen zu einem erhöhten Energiebedarf, der durch die Umwandlung von ADP in ATP gedeckt wird, und einem für die Umwandlung notwendigen erhöhtem Sauerstoffbedarf führt (vgl. Roy & Sherrington, 1890). Die direkte Folge ist eine Dilatation der umliegenden Kapillaren aufgrund lokaler pH- und Kaliumkonzentrationsänderungen. Durch Senkung des Flusswiderstandes wird das entsprechende Gewebe mit sauerstoffreichem Blut perfundiert. Lokale Schwankungen der Sauerstoffkonzentration lassen somit Rückschlüsse auf neuronale Aktivität zu.

Logothetis, Pauls, Augath, Trinath und Oeltermann (2001) sehen jedoch diesen Zusammenhang zwischen Energiebedarf des Gewebes und der resultierenden hämodynamischen Antwort kritisch und weitaus komplexer. Ihrer Meinung nach sind sowohl neuronale Aktivität und der Energiemetabolismus als auch Synapsenaktivität und die Glukoseaufnahme Prozesse, die eng miteinander verknüpft sind. Zur genaueren Klärung dieser Vorgänge wurden Untersuchungen an Menschen durchgeführt, welche gezeigt haben, dass 80 - 90% des gesamten kortikalen Glukosebedarfs für die Energieanforderungen der glutamatergen Neurone entfallen. Diese Ergebnisse implizieren, dass der größere Teil der hämodynamischen Signalveränderungen die energetisch aufwändigen Synapsenaktivitäten reflektiert und nicht, wie bisher angenommen, den direkten, lokalen Energiebedarf des Gehirnes. Logothetis et al. (2001) vermuten, dass die hämodynamische Antwort die ankommenden Signale und die intrakortikalen Verarbeitungsprozesse widerspiegelt, da in ihren Untersuchungen die hämodynamische Antwort am stärksten mit den lokalen Feldpotentialen (LFP) korrelierte.

Zur Steuerung des zerebralen Blutflusses machten Attwell und Iadecola (2002) differenziertere Angaben. Ihren Ausführungen zufolge wird die hämodynamische Antwort, ähnlich wie bei Logothetis et al. (2001), durch Neurotransmitter-vermittelte Signalgebungsprozesse gesteuert. Die Energie wird ihrer Meinung nach aber nicht für präsynaptische Aktivität, sondern für postsynaptische Strömungen und Aktionspotentiale benötigt. Auch sie führten den Beweis an, dass die hämodynamische Antwort nicht durch Signale ausgelöst wird, welche durch ein Energiedefizit des Gewebes entstehen, sondern durch neuronale Verarbeitungsprozesse. Der zerebrale Blutfluss wird lokal durch schnelle Glutamat-vermittelte Signalgebungsprozesse gesteuert. Global läuft dieser Prozess durch Amin- und Acetylcholin-vermittelte neuronale Systeme ab. Sowohl Logothetis et al. (2001), als auch Attwell et al. (2002) gelang es, die Ausführungen von Roy & Sherrington (1890) zu vertiefen und die Ursachen der hämodynamischen Antwort bzw. des zerebralen Blutflusses detaillierter zu klären.

Ogawa, Lee, Kay und Tank (1990a) gelang es nachzuweisen, dass sich das Blut aufgrund seiner Eigenschaften als endogenes Kontrastmittel für die MR-Bildgebung eignet, da sauerstoffreiches Hämoglobin andere magnetische Eigenschaften besitzt als sauerstoffarmes Hämoglobin (vgl. Ogawa et al., 1990a). Vollständig oxygeniertes Hämoglobin ist diamagnetisch und weist eine Suszeptibilität (= Aufnahmefähigkeit) auf, die der des umliegenden Hirngewebes entspricht. Desoxygeniertes Hämoglobin ist

dagegen paramagnetisch und führt aufgrund seiner veränderten Suszeptibilität in seiner Umgebung zu einer Störung der magnetischen Flussdichte. Diese Eigenschaften induzieren in der Gefäßumgebung einen lokalen Magnetfeldgradienten, der bei Anwendung z. B. einer EPI-Sequenz zu einer lokalen Signalmindering führt. Bei neuronaler Aktivität und dem damit verbundenen erhöhten Sauerstoffbedarf kommt es zu einer Zunahme des Blutflusses und der Anteil des oxygenierten Hämoglobins im Blut nimmt zu. Dadurch kommt es nicht nur zu einem Ausgleich des durch verstärkten lokalen Sauerstoffverbrauch erhöhten Desoxyhämoglobins, sondern auch zu seiner darüber hinausgehenden Abnahme. Eine verstärkte Abnahme des desoxygenierten Hämoglobins steigert den Suszeptibilitätseffekt und führt somit zu einem Anstieg des Messsignals. Dieser Zusammenhang der im MRT messbaren Signaldifferenz wird als BOLD-Kontrast (blood oxygen level dependent contrast) bezeichnet (vgl. Ogawa, Lee, Nayak & Glynn, 1990b). Bilder, die mit dieser Methode gewonnen werden, zeigen nicht nur die Morphologie des Gewebes, sondern auch die Aktivität des Nervengewebes (vgl. Internetadresse II, Crelier & Järmann, 2004).

5.1.5 Brain Impulse Response

In Hinblick auf die Anzahl der Stimuli und Kategorien, muss bei der Auswahl eines optimalen Paradigmas auf verschiedene Prozesse Rücksicht genommen werden. Im hier vorliegenden kognitiven Experiment wurden die Stimuli in Blöcken zusammengefasst. Bei der Präsentation eines Bildes hat sich die BOLD-Signal-Änderung noch nicht vollständig zurückgebildet, bevor der nächste Reiz folgt. Dadurch kommt es zu einer linearen Addition der BOLD-Verlaufskurven. Die so genannte hämodynamische Antwort beginnt mit einem *Initial dip*. Es erfolgt ein geringfügiger Abfall im MR-Signal zu Beginn der neuronalen Aktivität. Der weitere zeitliche Verlauf bedingt die Phase der *Progression*, bei der das Maximum des Anstiegs nach ca. 4 – 6 Sekunden liegt. In der sich anschließenden *Plateauphase* kommt es zu einem habitierenden statischen Signal. Das Signal kehrt in der letzten Phase der *Relaxation* auf das Niveau der Baseline zurück (siehe Abbildung 5.3). Das BOLD-Signal wird in der Folge über einen Kategorieblock gemittelt und mit dem BOLD-Signal der Ruhebedingung verglichen. Im Gegensatz dazu müssen bei einem „event-related-design“ die BOLD-Signalveränderungen der einzelnen Items ausgewertet werden, was die Dauer der Messung aufgrund der Relaxationszeit des Signals verlängert. Die der Arbeit zugrunde liegende Methode „block-design“ erlaubt hochfrequente

Stimulationen und hat ihre ideale Dauer bei ca. 20 – 30 Sekunden (vgl. Ligges, 2003). Aus diesem Grund wurden bei dem Versuch sechs Scans (4,31 Sekunden pro Scan) in einem Block pro Kategorie gemessen.

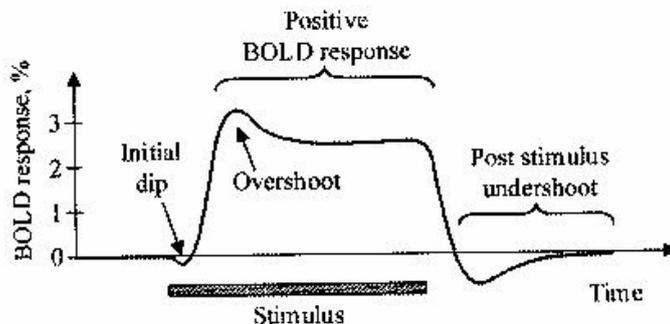


Abbildung 5.3: Verlauf der Brain Impulse Response (Quelle: Internetadresse I, Culham, 2004)

5.1.6 Kritische Betrachtung des MRT-Verfahrens

Der wohl größte Vorteil der Magnetresonanztomografie (= MRT) liegt in einem nicht-invasiven Verfahren zur Bildgebung, welches ohne potenziell schädlich-ionisierende Strahlung sowohl Morphologie als auch funktionelle Prozesse darstellen kann. Im klinischen Bereich ist es vorteilhaft, da ohne Umlagerung des Patienten jede beliebige Ebene im Körper abgebildet werden kann. Da nach langjähriger Erfahrung mit der Methode keine schädlichen Nebenwirkungen bekannt sind, ist die MRT mit den risikolosen Messwiederholungen gerade für die Forschung von hoher Relevanz. Zudem ermöglichte erst die MRT aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung die Lokalisation kortikaler und subkortikaler Areale. Die Magnetresonanztomografie macht sehr hohe Kontrastaufösungen möglich und ist deswegen besonders geeignet für Gehirn, Muskeln, Gelenke, Gesichtsschädel und Rückenmarkkanal. Außerdem sind Darstellungen in beliebiger Schichtorientierung (z. B. Operationsplanung) und quantitative Flussmessungen in Blutgefäßen möglich.

Der Hauptnachteil der MRT sind die hohen Betriebs- und Anschaffungskosten und der hohe technische Aufwand. Probanden mit Klaustrophobie, Unruhe bzw. leichte Bewegungen, hoher zeitlicher Aufwand, Lärmbelastung und Metall im oder am Körper limitieren die uneingeschränkte Nutzung. Die Signalintensitäten der MR-Bilder sind im Gegensatz zum CT (= Computertomografie) dimensionslos. Die exakte Lokalisation der Aktivitäten lässt sich nicht immer mit Sicherheit bestimmen. Signalunterschiede, welche mittels MRT gemessen werden, sind äußerst gering und müssen in aufwändigen Verfahren

statistisch aufbereitet werden. Da durch den Blutfluss die Oxygenierungsunterschiede vom eigentlichen Ort der Aktivität verlagert werden können, sollten Deutungen der Aktivierungen und ihre Rückschlüsse auf Funktionen und Aufgaben verschiedener Hirnareale mit Vorsicht vorgenommen werden.

5.2 Stichprobe

5.2.1 Vergleich: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Im ersten Vergleich wurden elf gehörlose (neun davon kongenital) Probanden (GL) und elf hörende, altersparallelisierte Personen (K1) gemessen. Alle Probanden wurden über Gebärdensprach-Dolmetschereinsätze oder aus dem Bekanntenkreis rekrutiert und erhielten eine Aufwandsentschädigung. Für jeden Probanden wurden T1- und T2*-gewichtete MRT-Aufnahmen des Kopfes durchgeführt. Ein gehörloser Proband musste im Nachhinein ausgeschlossen werden, da ein Teil des Paradigmas aufgrund technischer Probleme nicht gezeigt werden konnte. Die Stichprobencharakteristika aller verbleibenden Versuchspersonen können der Tabelle 5.2 entnommen werden.

Tabelle 5.2: Stichprobencharakteristika der Gruppen *Gehörlose* und *Kontrollgruppe 1*

Kriterium	Gehörlose (GL)	Kontrollgruppe 1 (K1)
<u>N</u>	10	11
weiblich	6	6
männlich	4	5
<u>Alter</u>		
Mittelwert	46,3	49,27
Standardabweichung	12,99	8,56
Range	34 – 68	33 – 69
<u>Zeitpunkt der</u> <u>Gehörlosigkeit:</u>		
Mittelwert	15 Monate	-
Range	0 Monate - 12 Jahre	-
<u>Ursachen der</u> <u>Gehörlosigkeit (N):</u>		
Meningitis	1	-
Unfall	1	-
ungeklärt	8	-

Folgende Kriterien für die Zuweisung in eine Gruppe wurden festgelegt:

Einschlusskriterien für Gehörlose

- Vorliegen der Gehörlosigkeit vor dem Erwerb der Sprachfähigkeit bzw. des Sprachverständnisses
- fließender, täglicher Gebrauch der Deutschen Gebärdensprache (DGS) bzw. Lautsprachbegleitender Gebärdensprache (LBG)
- Beherrschung des Daktylalphabets (Fingeralphabet)

Einschlusskriterien für Kontrollgruppe 1

- 100%ige Hörfähigkeit, parallelisierte Altersstrukturen

Ausschlusskriterien für Gehörlose

- Cochlear-Implantat (CI)
- Multimorbidität
- hochgradige Sehschwäche
- Linkshändigkeit

Ausschlusskriterien für Kontrollgruppe 1

- nachgewiesener Grad an Schwerhörigkeit
- hochgradige Sehschwäche
- Linkshändigkeit
- Kontakt mit Gebärdensprache

Alle Versuchspersonen waren dem *Edinburgh Inventory of Handedness* (Oldfield, 1971) nach Rechtshänder. Mit dem benannten Händigkeits-Fragebogen wurden zehn pantomimische Tätigkeiten (z. B. Schreiben, Zähne putzen) abgetestet und mit dem Lateralitätsindex (= LI) die Händigkeit bestimmt. Die gehörlosen Probanden hatten ihre Hörfähigkeit von Geburt an verloren. Es gab lediglich zwei Ausnahmen: ein Gehörloser erlaubte erst im zwölften Lebensjahr und eine Versuchsperson war hochgradig schwerhörig. Durch diese beiden Ausnahmen ergibt sich für den Zeitpunkt der Gehörlosigkeit ein Mittelwert von fünfzehn Monaten und ein Range von null bis zwölf

Jahren. Alle Gehörlosen, bis auf eine Schwerhörige mit achtzigprozentigem Schwerbehinderungsgrad, waren zu hundert Prozent schwerbehindert.

5.2.2 Vergleich: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Zur direkten Replizierbarkeit der Ergebnisse des ersten Vergleiches und aufgrund der Besonderheit dieser spezifischen Gruppe, wurden im zweiten Vergleich acht Gebärdensprachdolmetscher (D) und zehn hörende, altersparallelisierte Personen (K2) rekrutiert. Die Probanden wurden wie für die anderen Gruppen über Dolmetschereinsätze und den Bekanntenkreis gewonnen und waren ausschließlich Rechtshänder. Es erfolgten ebenfalls T1- und T2*- gewichtete MRT-Aufnahmen des Kopfes. Die Stichprobencharakteristika werden aus der Tabelle 5.3 ersichtlich.

Tabelle 5.3: Stichprobencharakteristika der Gruppen Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 2

Kriterium	Gebärdensprachdolmetscher (D)	Kontrollgruppe 2 (K2)
<u>N</u>	8	10
weiblich	5	5
männlich	3	5
<u>Alter</u>		
Mittelwert	33,12	25,9
Standardabweichung	10,88	3,00
Range	24 – 52	24 – 33

Die Selektionskriterien für die Aufnahme der Personen in die jeweilige Probandengruppe wurden folgendermaßen festgelegt:

Einschlusskriterien für Dolmetscher

- Beherrschung der Deutschen Gebärdensprache (DGS) bzw. Lautsprachbegleitender Gebärdensprache (LBG)
- mindestens fünfjährige Berufserfahrung bei einer Mindestanforderung von vier Dolmetschereinsätzen pro Woche
- Beherrschung des Daktylalphabets (Fingeralphabet)

Einschlusskriterien für Kontrollgruppe 2

- 100%ige Hörfähigkeit, parallelisierte Altersstrukturen

Ausschlusskriterien für Dolmetscher

- nachgewiesener Grad an Schwerhörigkeit
- hochgradige Sehschwäche
- Linkshändigkeit

Ausschlusskriterien für Kontrollgruppe 2

- nachgewiesener Grad an Schwerhörigkeit
- hochgradige Sehschwäche
- Linkshändigkeit
- Kontakt mit Gebärdensprache

5.3 Materialien für das fMRT-Experiment

Um die im theoretischen Teil beschriebenen Unterschiede in der Verarbeitung visueller Stimuli zwischen gehörlosen und hörenden Menschen zu untersuchen, musste für das fMRT-Paradigma geeignetes Stimulusmaterial implementiert werden. Zu diesem Zweck wurden mithilfe von Gebärdenlexiken aus Hamburg (vgl. Maisch & Wisch, 2000; Maisch & Wisch, 2002a; Maisch & Wisch, 2002b) visuelle Stimuli erarbeitet, um die postulierten Unterschiede in Sprachverarbeitungsprozessen und Verarbeitungsmechanismen bei visuellen Aufgaben gezielt auszulösen. Es wurden sechs verschiedene Kategorien erarbeitet, welche visuelle und semantische Decodierungsprozesse ansprechen sollten.

Allgemeingültiges zu den Kategorien:

Alle Bilder der Kategorie „Gebärden“ wurden den Büchern *Gebärdenlexikon: Band 1 Grundgebärden, Band 2 Mensch und Band 3 Natur* (vgl. Maisch & Wisch, 2000; 2002a; 2002b) entnommen. Das Buch lehnt sich Hamburger Gebärden an, welche als allgemeingültig für die in Deutschland vorherrschenden verschiedenen Dialekte gelten. Obwohl die Gehörlosen aus Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt stammten, waren ihnen diese Abbildungen geläufig und vertraut, da Gebärden aus diesen Büchern

deutschlandweit verwendet werden. Die ausgewählten Gebärden waren Substantive, neutral, alltagsgebräuchlich und in ihrer Bedeutung den Gehörlosen bekannt. Keines der Bilder war ekelerregend bzw. abstoßend oder enthielt einen bewegungsinduzierenden Inhalt (z. B. Turnschuhe, Joggen usw.). Es wurde versucht, Bilder zu selektieren, denen nur eine Bedeutung zuzuordnen war. Dies ist in der Regel schwer zu realisieren, da es aufgrund der verschiedenen Dialekte zu geringen Abweichungen bei der Ausführung von Gebärden kommen kann. Alle Bilder (fünf Kategorien) wurden mit einer Auflösung von 500 x 600 Pixel (Breite x Höhe) auf einem standardisierten, grauen Hintergrund dargeboten. Die Kategorie „Wörter“ war in weißer Schrift auf schwarzem Hintergrund zu sehen. Als Fixations- bzw. Ruhebedingung diente ein zentral platziertes, weißes Kreuz auf ebenfalls schwarzem Hintergrund. Die Items aller Kategorien sind im Anhang A auf der beigefügten CD aufgeführt.



(1) Gebärden (statisch)

Aus den oben genannten Gebärdensprachlehrbüchern wurden Bilder ausgewählt, welche die Forderungen nach Substantiv-Gebärden und Bildern ohne expliziten Bewegungscharakter erfüllten. Die Merkmale der selektierten Bilder ähnelten jenen der Gebärden mit Pfeil, nur enthielten sie keine Pfeile. Ihnen konnten durch die Gruppe der Gehörlosen und der Dolmetscher eindeutige Wörter zugeordnet werden. Den Hörenden verschließt sich die korrekte Übersetzung der Bilder.



(2) Gebärden (mit Pfeil)

Alle Bilder wurden ebenfalls den Büchern der oben genannten Serie entnommen, waren den Gehörlosen bekannte, alltägliche dargestellte Substantive und enthielten ganz bewusst einen bewegungsinduzierenden Charakter (mittels Pfeilen). Ziel der Darbietung dieser Kategorie war es, bei den Gehörlosen und der Gruppe der Dolmetscher eine Übersetzung der Gebärde in das entsprechende Wort auszulösen. Die hörenden Kontrollgruppen sollten dagegen nicht in der Lage sein, den semantischen Inhalt zu entschlüsseln. Sie sollten ausschließlich die gestenähnlichen Bilder als vertraute Merkmale wahrnehmen und die durch die Pfeile entstehenden Bewegungsverläufe mental umsetzen.



(3) Objekte

Es wurden bekannte Gegenstände des alltäglichen Gebrauchs selektiert, welche keine Bewegungen induzierten. Die Kategorie sollte eine Aufgabe darstellen, die von Kontrollpersonen und Gebärdenden gleichermaßen verarbeitet wird.



(4) Gesten

Die Bilder dieser Kategorie zeigten bekannte, allgemeinverständliche Gesten, die von Menschen zur nonverbalen Kommunikation eingesetzt werden und auch in verschiedenen Kulturkreisen gleichermaßen verstanden werden. In Anlehnung an das Buch *Körpersprache* (vgl. Molcho, Klinger & Luszkat, 1983) wurden alle Gesten von Personen nachgestellt, mit einer Digitalkamera aufgenommen und in Adobe Photoshop[®] bearbeitet, um das gesamte Bildmaterial optisch zu vereinheitlichen.

Die Gesten waren nicht in konkret zugeordnete Wörter decodierbar, sondern wurden in der Regel in Wortgruppen bzw. kurze Sätze übersetzt.



(5) Gebärden (ohne Pfeil)

Alle Items der Kategorie waren ursprünglich Gebärden mit Pfeilen. Ziel war es, diese Aufgabe den anderen Kategorien gegenüber zu erschweren. Das Stimulusmaterial wurde modifiziert, indem mithilfe von Adobe Photoshop[®] die Pfeile aus den Bildern entfernt wurden. Die Merkmale jener entstandenen Bilder ähnelten denen der *Gebärden (statisch)*; allerdings waren sie wegen der fehlenden Pfeile bedeutungslos für die Gehörlosen. Diese Kategorie sollte sich für die Gehörlosen ähnlich wie das Lesen wörtähnlicher, semantisch nicht sinnvoller Buchstabenfolgen für die Hörenden verhalten. Die *Gebärden (ohne Pfeil)* sollten die schwierigste Anforderung an die gehörlosen Probanden darstellen. Für die Hörenden war diese Kategorie ebenso schwer semantisch zu decodieren, wie die Kategorien *Gebärden (statisch)* und *Gebärden (mit Pfeil)*.



(6) Wörter

Die Inhalte dieser Kategorie zielten auf Verarbeitungsprozesse von Semantik für alle Gruppen ab. Alle Wörter waren alltagsgebräuchliche Substantive, hatten eine Länge von vier bzw. fünf Zeichen und enthielten keine Assoziationen zu Bewegungen.

Sie wurden aus dem *Häufigkeitwörterbuch gesprochener Sprache* (Ruoff, Fuchs, Gersbach, Graf & Thiers, 1990) entnommen. Im hier beschriebenen Paradigma wurden ausschließlich hochfrequente Wörter (0,85% bis 0,19 %) als Stimuli dargeboten. Die bewusste Entscheidung gegen Häufigkeitwörter *geschriebener Sprache* begründet sich aus einer stark verminderten Lese- und Schreibbereitschaft Gehörloser gegenüber Hörenden und dem Ziel, für alle Versuchspersonen gleiche Bedingungen zu schaffen.

5.4 Paradigma

Die Messung begann mit einem hochauflösenden T1-Bild mit 192 Schichten à 1 mm (highres). Danach schlossen sich zwei fMRT-Messungen an: ein Bilderblock und ein Fingertappingblock (für das in Kapitel 16 dargestellte Motorik-Paradigma), welcher zeitlich nacheinander auf beiden Seiten durchgeführt wurde. Die fMRT-Messungen wurden mit 40 Schichten à 3 mm aufgenommen. Aufgrund der hohen Anzahl verschiedener Stimulustypen und der stabileren hämodynamischen Reaktion fiel die Entscheidung zugunsten des Blockdesigns zur Durchführung des Paradigmas. Die Abbildungen 5.4 und 5.5 zeigen die Darbietungsabfolgen des Bilder- und Fingertappingblockes.

Teil 1

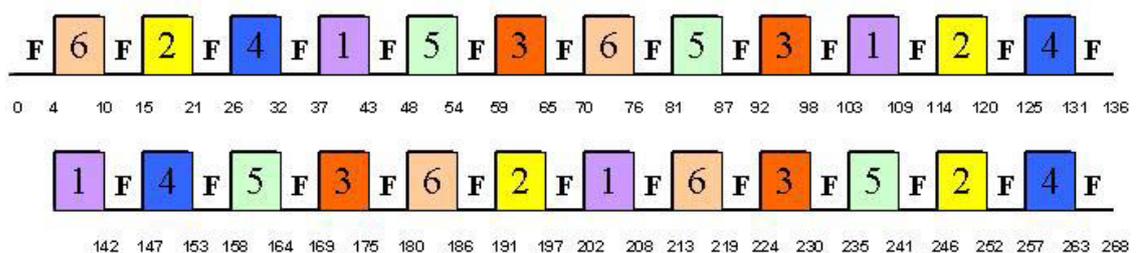


Abbildung 5.4: Darbietungsreihenfolge der Stimuli für den Bilderblock. (F) Fixationsbedingung; (1) bis (6) Kategorien (eigene Darstellung)

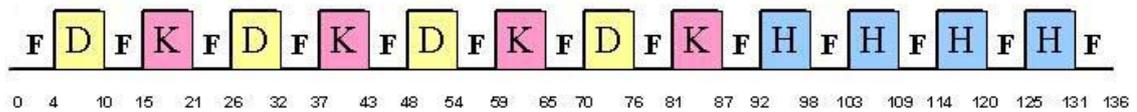
Teil 2 & 3

Abbildung 5.5: Darbietungsreihenfolge der Stimuli für beide Fingertappingblöcke. (F) Fixationsbedingung; (D) Daumen; (K) Kleiner Finger; (H) Hand (eigene Darstellung)

In Bezug auf das im Abschnitt 5.3 dargestellte Bildmaterial wurden sechs verschiedene Stimuluskategorien in das Bilderparadigma implementiert. Um einen Kompromiss zwischen der Messdauer und der statistischen Power zu erzielen, wurde jede Kategorie mit vier Blöcken dargeboten. Innerhalb eines Blockes wurden sechs Scans erhoben und je sieben Trials (Bilder) der Kategorie gezeigt. Die Reihenfolge der Blöcke wurde mit *research randomizer*[®] pseudorandomisiert, um Habituationseffekte auszuschließen. Die einzelnen Blöcke aller Bedingungen wurden alternierend mit der Fixationsbedingung (F) dargeboten, da zur statistischen Auswertung eine regelmäßige Wiederholung der Ruhebedingung als Baseline notwendig ist. Die Darbietung der Fingertapping-Blöcke erfolgte mit drei verschiedenen Bedingungen à vier Blöcken (1 Block = 6 Scans) mit je 25 Wiederholungen. Die Probanden wurden bezüglich der beginnenden Hand randomisiert und führten das Tapping nacheinander an beiden Händen aus. Ein Überblick über den Verlauf des Paradigmas ist in der Abbildung 5.6 zu sehen.

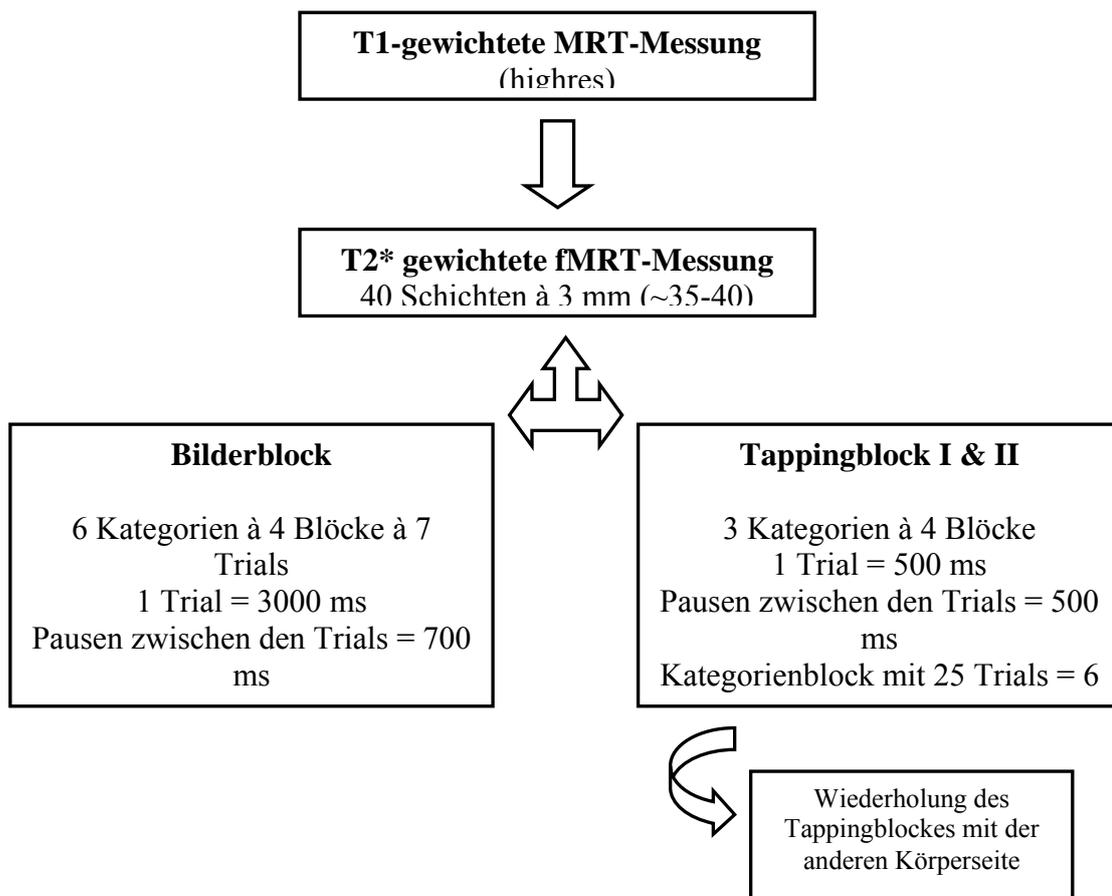


Abbildung 5.6: Paradigmaverlauf (eigene Darstellung)

5.5 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Untersuchungen stand ein EPI-fähiger Siemens Magnetom Vision 1,5 Tesla Magnetresonanztscanner vom Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Universitätsklinik Jena zur Verfügung. Der Scanner besitzt spezielle Gradientenspulen und eine Kopfspule, die auch als Fixationshilfe für den Kopf fungierte, um Kopfbewegungen in alle drei möglichen Ebenen zu vermeiden. Der Raum, in dem sich der Scanner befand, war ca. 18 m² groß und mittels einer Scheibe vom angrenzenden Kontrollraum aus einsehbar. Im Kontrollraum befanden sich ein PC zur Aufnahme der MRT-Daten mit der Software SIEMENS MAGNETOM Numaris VB 33A[®], eine Überwachungskamera mit Bildschirm (Siemens, VM 1) und ein Kontrollrechner (Philips Brilliance, 151AX). Von dort aus wurden die Messungen gesteuert und beobachtet. Über einen im Kontrollraum befindlichen Computer wurden mithilfe des ERTS (Experimental

Run Time System; EXKEY-Logic; 3.33 BeriSoft Cooperation 2002[©]) die Bilder über einen Beamer präsentiert und die Zeiten der Trigger aufgezeichnet. Am Fußende des Scannertisches stand ein Beamer (60 Hz; TOSHIBA TLP 710E; 3LCD Data Projektor) auf einem 1,35 m hohen Pult zur Darbietung des Stimulusmaterials. Im Scanner wurde direkt auf der Kopfspule ein Spiegel befestigt, dessen Gehäuse 12 cm x 12,5 cm x 15 cm (B x H x T) groß war und in dem der darin angebrachte Spiegel um 45° gekippt war. Die Versuchspersonen hatten einen Abstand von ca. 8 cm zwischen Augen und Spiegel. Das Stimulusmaterial wurde vom Beamer auf den Spiegel projiziert und war für die Probanden in einer Größe von ca. 8 cm x 10 cm (B x H) im Spiegel erkennbar. Der Abstand zwischen Projektor und Spiegel betrug 4,17 m. Abbildung 5.7 zeigt die verschiedenen Einheiten, die im experimentellen Setup miteinander verknüpft sind.

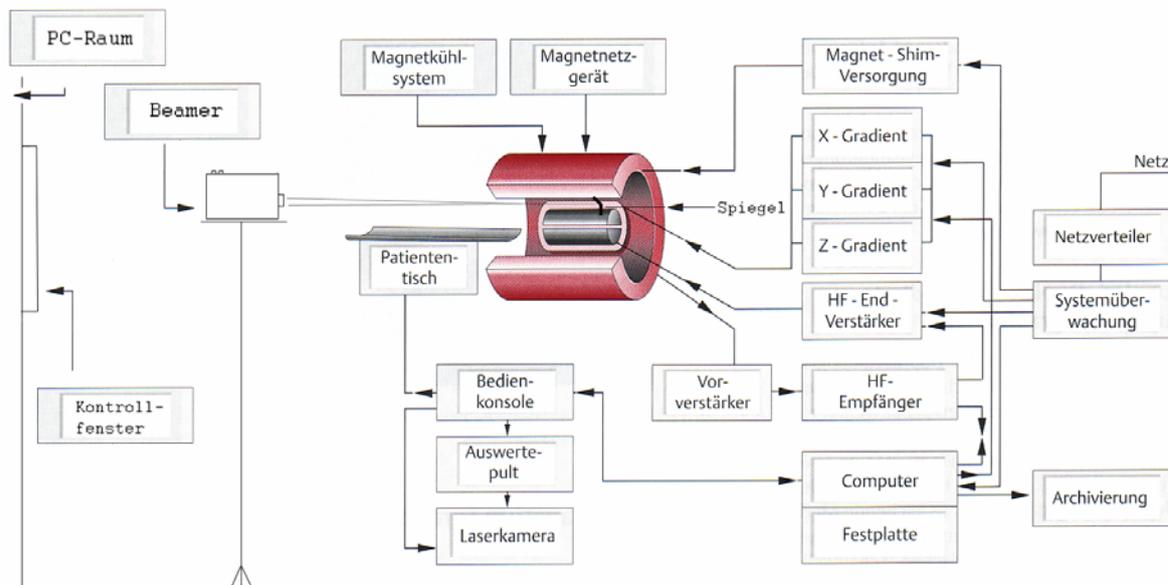


Abbildung 5.7: Schematisierter experimenteller Aufbau des MRT-Systems (Quelle: modifizierte Abbildung aus Thurn, Bücheler, Lackner & Thelen, S. 26, 1998)

5.6 Versuchsablauf

Aufklärungsgespräch

Beim Erstkontakt wurden den Probanden die Aufgaben kurz erklärt und sie darüber aufgeklärt, dass die Messung zu jedem Zeitpunkt ohne Begründung abgebrochen werden

darf (vgl. Anhang B auf der beigefügten CD). Danach klärte der Dienst habende Radiologe die Versuchspersonen anhand eines standardisierten Patientenaufklärungsbogens auf (vgl. Anhang C auf der beigefügten CD). Alle Messungen wurden nicht-invasiv durchgeführt.

Instruktionen

Im Anschluss an die Einwilligung durch den Probanden wurde der Versuchsablauf vom Testleiter detailliert erklärt. Die Instruktion für den Bilderteil lautete, die Bilder aufmerksam zu betrachten und zu versuchen, deren Bedeutung zu verstehen. Dazu sollte die verstandene Bedeutung innerlich verbalisiert werden. Ein Mitsprechen oder Nachgebärden war nicht erwünscht. Die Gehörlosen wurden von einem Gebärdensprachdolmetscher mittels DGS instruiert und ihr Verständnis durch gezeigte Beispiele und Nachfragen gesichert.

Für den Fingertappingteil sollten die Versuchspersonen den entsprechenden Finger gestreckt mit einem Winkel von ca. 45° im Rhythmus eines blinkenden, computergestützten Wortes nach dorsal flektieren. Die Aufgabe wurde mit geschlossenen Augen geübt und im Scanner unter konstanten Bedingungen wiederholt. Das Tapping musste im Sekundentakt durchgeführt werden. Dabei wurden die Probanden aufgefordert, eine ihnen natürliche Bewegung zu produzieren. Die Hände wurden auf den Oberschenkeln abgelegt und Zeige-, Ring- und Mittelfinger mit Klebeband festgeklebt, um eine Mitbewegung dieser Finger zu vermeiden.

Vorbereitung

Alle Versuchspersonen mussten jegliches Metall (z. B. Ohrringe, Uhr, Reißverschluss) entfernen. Sowohl die hörenden als auch die gehörlosen Probanden erhielten Ohrstöpsel als Gehörschutz, um gleiche Bedingungen für alle zu schaffen. Personen, die eine geringe Sehschwäche hatten, erhielten eine Brille, die extra für MRT-Bedingungen angefertigt war. Die Probanden lagen auf der Patientenschiene auf dem Rücken und ihr Kopf wurde von der MTA (= medizinisch-technische Assistentin) mittig in die Kopfspule gelegt. Der Proband erhielt eine Notfallklingel auf den Bauch und wurde am Kopf mit kleinen Polstern in der Kopfspule stabilisiert, um Bewegungsartefakte zu minimieren. Danach wurde der Spiegel auf der Kopfspule angebracht und die Person gebeten, die Augen zu schließen. Ein Laserstrahl registrierte die Lage des Kopfes am Anfang und legte somit genau die Mitte der Kopfspule fest. Das daraufhin geeichte Epizentrum der Kopfspule wurde als Referenzpunkt benutzt. Danach wurde der Proband in das Homogenitätszentrum des

Scanners gefahren. Der Abstand zwischen Laserstrahlpunkt und Homogenitätszentrum betrug bei allen Versuchspersonen 1078 mm. Danach erfolgten keine Instruktionen mehr, um gleiche Bedingungen für alle Probanden zu schaffen.

Messverlauf

Es erfolgte eine Ausrichtung der Schichten in Abhängigkeit der Regionen, in denen gewünschte Aktivität induziert werden sollte. Zu Beginn der Messung wurde ein Scout (Testaufnahme) aufgenommen, der eine grobe Darstellung des Kopfes und eventuell auftretende Artefakte zeigte. Danach wurden die vierzig Schichten parallel zur AC-PC Linie (Anteriore Commissur – Posteriore Commissur) ausgerichtet und eine Probemessung durchgeführt, um Artefakte auszuschließen. Abbildung 5.8 zeigt ein Beispiel für ein Artefakt und vierzig bereits ausgerichtete Schichten.

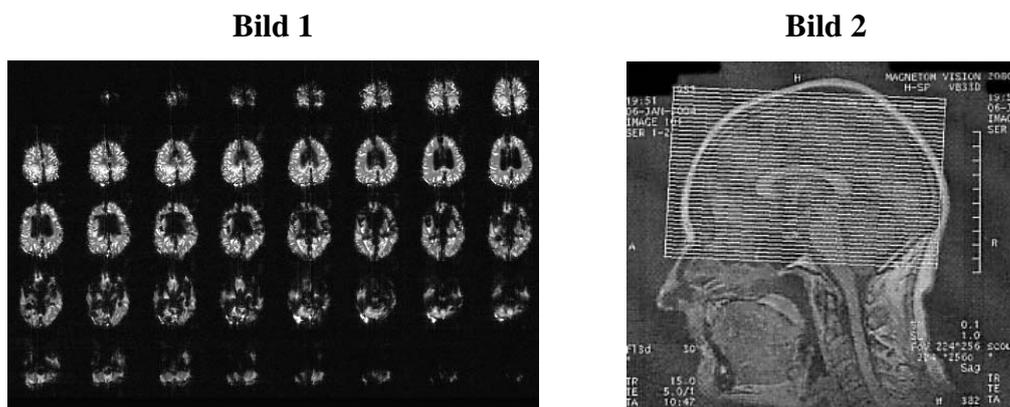


Abbildung 5.8: **Bild 1:** Beispiel eines Artefaktes; verursacht durch Metall in der Nähe der Kopfspule (Quelle: Abbildung aus durchgeführten Messungen entnommen) **Bild 2:** 40 Schichten (transversal); an der AC-PC Linie ausgerichtet (Quelle: Abbildung aus durchgeführten Messungen entnommen)

Die eigentliche Messung begann mit einer dreidimensionalen, anatomischen T1-gewichteten Aufnahme (ca. 8 – 12 Minuten). Danach wurden die Probanden angetippt, damit sie die Augen für den sich anschließenden funktionellen Teil öffneten. Es wurden drei zweidimensionale, funktionelle T2*-gewichtete Epi-Sequenzen mit je 268, 136 und 136 Scans durchgeführt. In Tabelle 5.4 sind alle technischen Daten für die strukturellen und funktionellen MRT-Messungen zusammengefasst. Bei der späteren Datenverarbeitung wurden je die ersten vier Scans verworfen. Nach Abschluss der Messungen wurden die

Probanden außerhalb des Scanners stichprobenartig und mündlich auf Verständnis geprüft. Es wurden keine Verhaltensdaten erhoben.

Tabelle 5.4: Übersicht der technischen Parameter für die T1- und T2*-gewichteten Messungen

Parameter	T1-gewichtete Messung (strukturelle Daten)	T2*-gewichtete Messung (funktionelle Daten)
Repetitionszeit (TR)	15 ms	4117 ms
Echo-Zeit (TE)	5 ms	60 ms
Flip-Winkel (FA)	30°	90°
Field of View (FoV)	256 mm ²	192 mm ²
Matrixgröße (Bildauflösung)	256 x 256 Voxel	64 x 64 Voxel
Schichtanzahl	192	40
Schichtdicke	1 mm	3 mm
Abstand zwischen den Schichten	0 gap	0 gap
Anzahl der Volumen	1	268 / 136 / 136
Voxelgröße	1 x 1 x 1 mm ³	3 x 3 x 3 mm ³

5.7 Verarbeitung der fMRT-Daten

5.7.1 Darstellung von fMRT-Daten im *Talairach-Raum*

Die aufgenommenen fMRT-Daten wurden mit dem Programm *Brain Voyager 2000* (Version 4.96 Brain Innovation; Niederlande) weiterverarbeitet. Ziel war es, auf Gruppenebene Vergleiche in den durch die verschiedenen Stimuli hervorgerufenen Aktivierungsmustern anzustellen. Dafür war eine standardisierte Abbildung aller individuellen Gehirne notwendig. Aus diesem Grund mussten die Daten aller Probanden in eine allgemein gültige, standardisierte Form gebracht werden. Diese Vorgehensweise zur Standardisierung soll im Abschnitt 5.7.2 beschrieben werden.

Talairach & Tournoux (1988) entwickelten ein ursprünglich für die Neurochirurgie gedachtes, stereotaktisches Koordinatensystem, den sogenannten *Talairach-Raum* (vgl. Talairach & Tournoux, 1988). Es ermöglicht die Standardisierung unterschiedlich großer Gehirne. Dieses System ist in einem weiteren Schritt nutzbar, um physiologische Prozesse

zu lokalisieren. Bei einer tomografischen Bildaufnahme besteht jedes Schnittbild in diesem Koordinatensystem aus Bildpunkten von gleicher Größe und Form in einer orthogonalen Punktmatrix. Ein Bildpunkt dieser Matrix wird als *Pixel* bezeichnet (= picture element). Überführt man die Schnittbilder in ein orthogonales, dreidimensionales Koordinatensystem, spricht man von einem *Voxel* (= volume element).

Talairach & Tournoux (1988) entwickelten in diesem Zusammenhang ein Standardgehirn (= Referenzgehirn), mit dessen Hilfe es möglich ist, jeden Punkt im beschriebenen dreidimensionalen Koordinatensystem zuzuordnen. Dieses standardisierte Gehirn fungiert in *Brain Voyager 2000* als Referenzgehirn, an dessen Koordinaten sich die Standardisierung der individuellen Gehirne orientiert. Mithilfe eines so genannten *Hirnatlas'* wird die Lokalisation anatomischer Strukturen erleichtert (vgl. Talairach & Tournoux, 1988). Im Fall dieser Studie wurde der *Talairach-Daemon* (Talairach Daemon Client, Version 1.1, Research Imaging Center, University of Texas Health Center, San Antonio, Texas), welcher eine Datenbank mit allen definierten Voxeln darstellt, verwendet. Diese diente der Zuordnung anatomischer Strukturen zu den entsprechend von Talairach & Tournoux (1988) festgelegten Koordinatenpunkten. Der Talairach-Daemon beruht auf den Koordinaten des Talairach-Atlas von Talairach & Tournoux (1988). Der Talairach-Atlas wurde auf der Grundlage einer sechzigjährigen Frau erstellt, deren Gehirn heute als standardisiertes Referenzgehirn dient.

Des Weiteren ermöglicht die Anwendung eines solchen Hirnatlas' die Festlegung von, durch den Versuchsleiter für geeignet gehaltenen, definierten Regionen. Diese werden auch als *Regions of interest* (= ROI) bezeichnet und entsprechen jeweils anatomischen Strukturen, wie z. B. dem primären visuellen Kortex (= V1). Im Gegensatz dazu wird bei einer *whole brain*-Herangehensweise das gesamte Gehirn ohne Festlegung bestimmter Regionen nach Aktivierungen untersucht. In einer ROI werden einige hundert respektive tausend Voxel zusammengefasst, die zur gleichen anatomischen Struktur gehören (z. B. alle Voxel des V1). Dies erleichtert den Umgang mit der Datenmenge erheblich (die Anzahl aller Voxel der grauen Substanz des Gehirnes beläuft sich auf ca. 72.000 Voxel à $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$) und erlaubt die direkte anatomisch-physiologische Interpretation der aktivierten Voxel. Die Definition von ROI gestattet somit den direkten inter- und intraindividuellen Vergleich der Messungen verschiedener Probanden und Gruppen. Ziel ist die Nutzung der Analyse von, in den Talairach-Raum transformierten, fMRT-Bildern aller Probanden zur Feststellung statistisch signifikanter Unterschiede zwischen Versuchs-

und Kontrollgruppen mittels voxelorientierter Herangehensweise (hier: Festlegung von *ROI*).

5.7.2 Ablauf der Einzelschritte zur Transformation der Daten

5.7.2.1 Erstellen von Positionsfiles zur Lagebestimmung des Kopfes

Die zunächst durchgeführte Aufnahme des Gehirnes ohne Aufgabenstellung (= *highres*) an den Probanden lieferte *anatomische (strukturelle) Files*. Das bedeutet, dass die Aufnahmen T1-gewichtet waren (TR = 15 ms, TE = 5 ms, Flip-Winkel = 30°, FoV = 256 mm², 256 x 256 matrix). Die anschließende Aufnahme mit Aufgabenstellung erbrachte *funktionelle Files*. Diese waren T2*-gewichtet (TR = 4117 ms, TE = 60 ms, Flip-Winkel = 90°, FoV = 192 mm², 64 x 64 matrix). Genauere Angaben dazu können in Abschnitt 5.6 nachgelesen werden. Es erfolgte der Import je eines Files aus einer funktionellen (z. B. Bilderparadigma) und der anatomischen (= *highres*) Aufnahme in das Programm MATLAB (Version 6.5.0, Release 13). Dort wurden Positionsfiles erstellt, damit alle Daten im späteren Koordinatensystem (*field of view*) die gleiche Position hatten. Somit wurde die Lage jedes einzelnen Kopfes im Raum festgelegt, und die funktionellen und anatomischen Aufnahmen waren deckungsgleich.

5.7.2.2 Erstellen einer funktionellen Datei und Anlegen einer Referenzdatei als Ausgangsdatei zur Bearbeitung aller folgenden Volumes

Mithilfe von *Brain Voyager 2000* wurde als erster Schritt eine Datei der funktionellen Rohdaten erstellt. Bei diesem Schritt zur Erstellung funktioneller Bilder wurde für jeden Scan eine Datei erstellt, die alle Schichten enthielt und somit für jeden Scan T2*-gewichtete Bilder (*fmr-files*) berechnet. Ein *Scan* wird auch als *Volume* bezeichnet und entspricht der Gesamtzahl aller Schichten, die aufgenommen werden. Für dieses Experiment bedeutete das, dass bei jedem Scan 40 Schichten aufgenommen wurden. Die Abbildungen 5.9 und 5.10 verdeutlichen diesen Vorgang grafisch. An dieser Stelle sei bemerkt, dass die gebräuchliche Bezeichnung *Volume(s)* im fortlaufenden Text weitergeführt wird.

In einem weiteren Schritt wurde eine Datei des ersten Volumes als Referenzdatei zur Bearbeitung aller folgenden Volumes angelegt (*firstvol.fmr*-file) (Bearbeitung der folgenden Scans siehe Abschnitt 5.7.2.3).

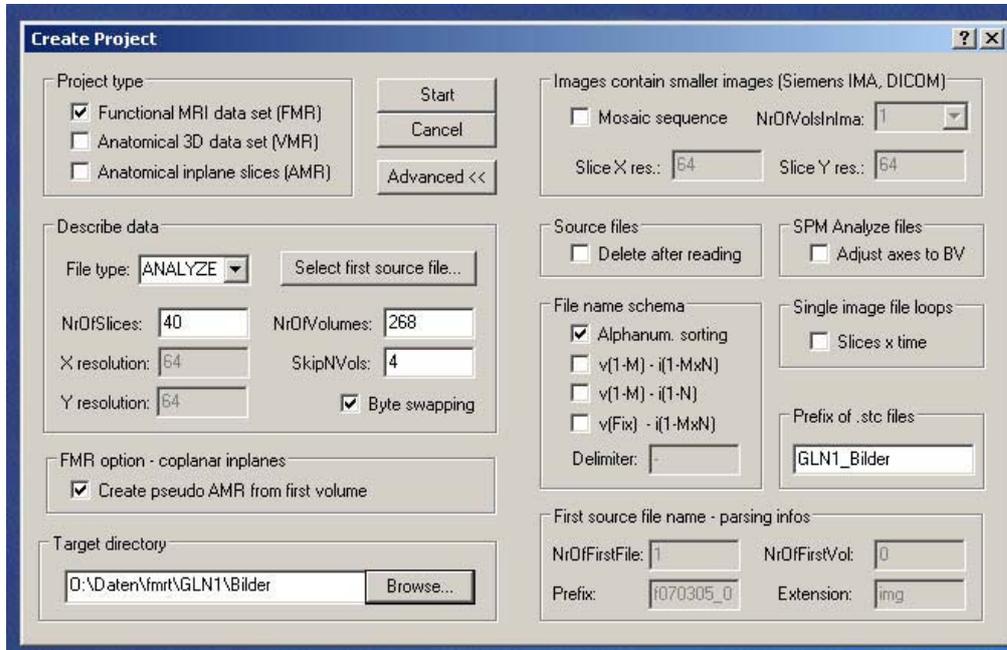


Abbildung 5.9: Eingabe notwendiger Parameter zum Erstellen einer funktionellen Datei (Quelle: Brain Voyager 2000)

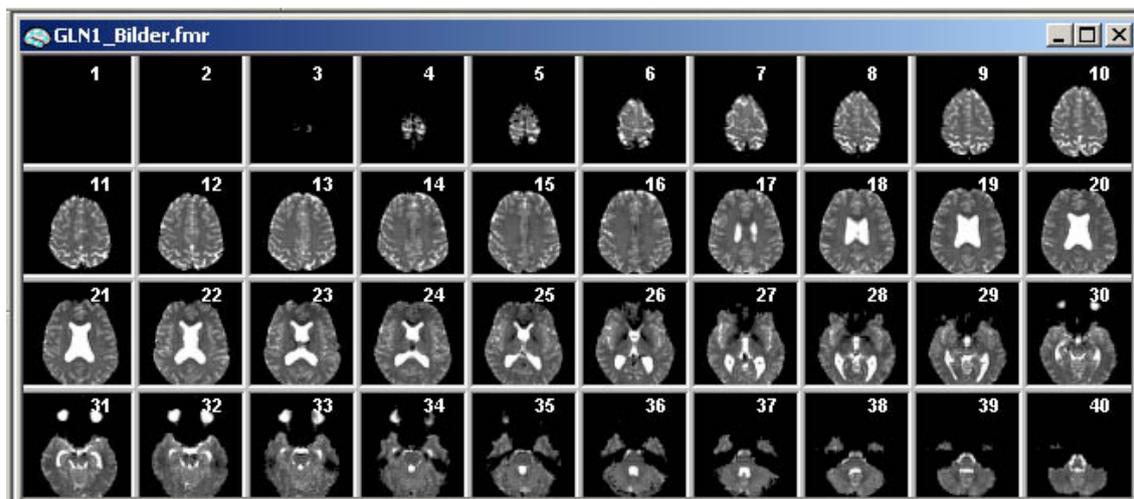


Abbildung 5.10: Eine Datei der funktionellen Rohdaten über alle Schichten (hier: 40 Schichten). Das Bilderparadigma bestand aus 268 funktionellen Scans. Das Motorikparadigma wurde mit 136 Scans je bewegter Seite durchgeführt. (Quelle: Brain Voyager 2000)

5.7.2.3 Bewegungskorrektur der funktionellen Volumes zum Ausgleich von Bewegungsartefakten

Im Anschluss an die eben beschriebenen Schritte wurde eine Bewegungskorrektur aller aufgenommenen funktionellen Scans durchgeführt. Der erste aufgenommene Scan diente für diese Korrektur als Referenz (Erstellung der Referenzdatei vgl. Abschnitt 5.7.2.2). Durch diesen Vorgang wurden Abweichungen bezüglich der Signalintensität zwischen dem Referenz-Volume und den daran anzuleichenden Volumes minimiert. Die Korrektur erfolgte in sechs verschiedene Richtungen: Ausgleich von Vor- und Zurückbewegungen, Links- und Rechtsbewegungen und Auf- und Abbewegungen des Kopfes im Scanner (vgl. Abbildungen 5.11 und 5.12). Personen, bei denen die registrierten Abweichungen von der Nulllinie (Nulllinie = keine registrierten Bewegungen) größer als $\pm 2,0$ Millimeter waren, wurden von den Berechnungen ausgeschlossen, da eine notwendige, millimetergenaue Übereinstimmung dieses Datensatzes mit dem Referenzgehirn bei Bewegungsartefakten oberhalb der festgelegten Grenze nicht erreicht werden könnte. Bei keinem der Probanden waren die Abweichungen größer als $\pm 2,0$ Millimeter. Hält man sich vor Augen, wie dicht die einzelnen Brodmann-Areale beieinander liegen, werden solch strenge Korrekturbedingungen verständlich, um aktivierte Voxel später eindeutig anatomischen Strukturen zuordnen zu können. Schon sehr geringe Kopfbewegungen führen zu Signalverzerrungen und erhöhen die Varianz der Daten (vgl. Reiser & Semmler, 1997).

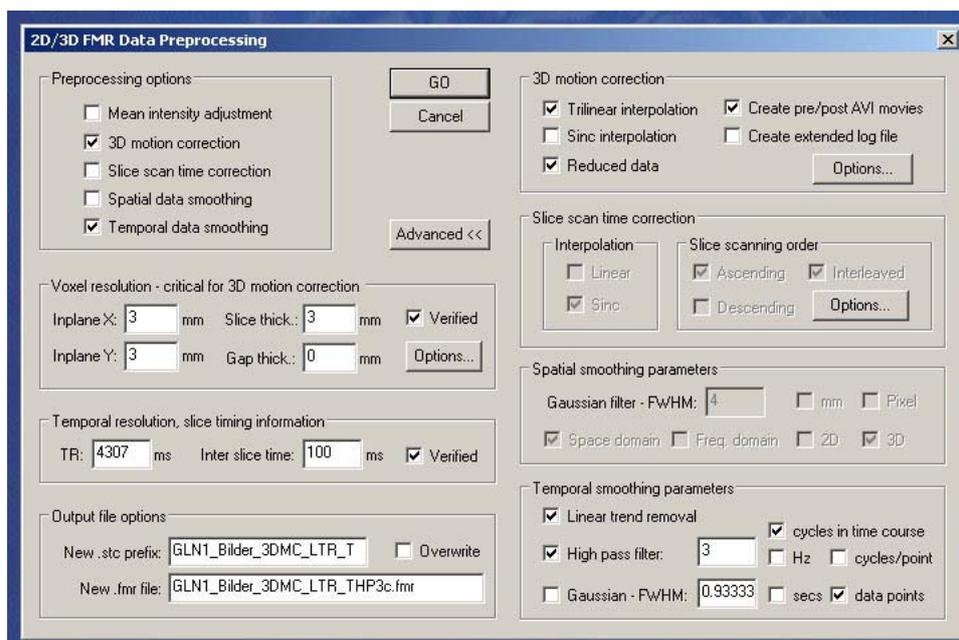


Abbildung 5.11: Parameterfestlegung für die Bewegungskorrektur (*motion correction*) (Quelle: Brain Voyager 2000)

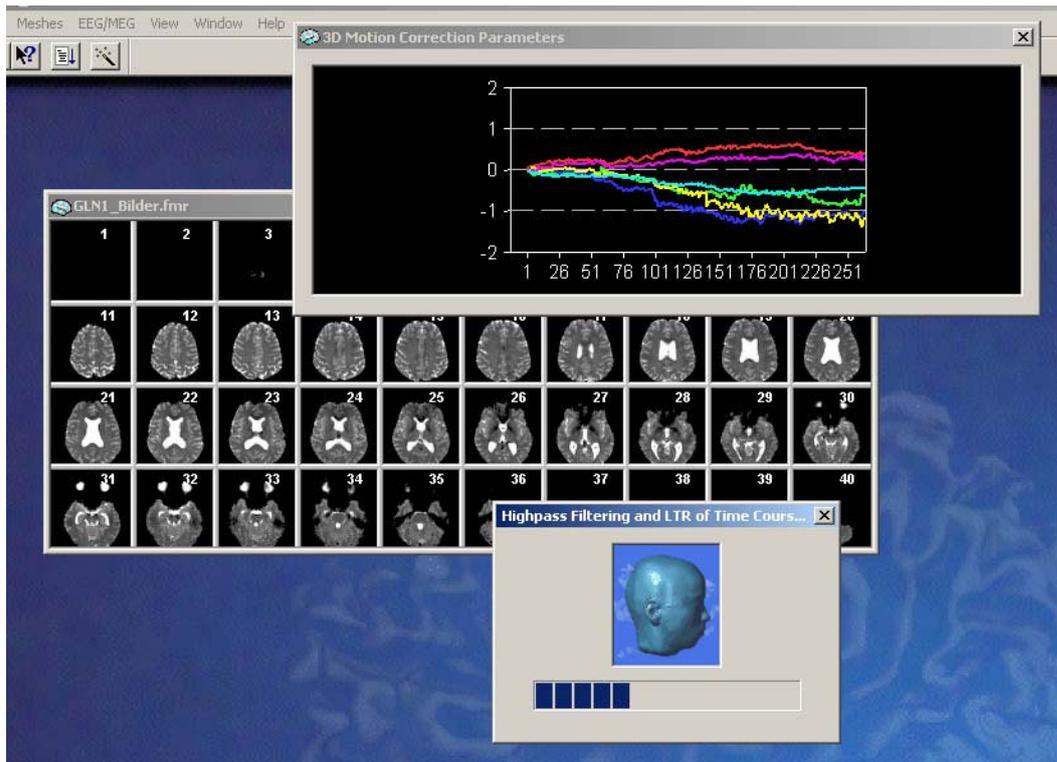


Abbildung 5.12: Berechnung der Abweichungen von der Nulllinie in sechs Richtungen (dargestellt mit sechs verschiedenen Farben) (Quelle: Brain Voyager 2000)

5.7.2.4 Zeitliche Korrektur der funktionellen Volumes und Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Im Anschluss an diesen Schritt wurden die gleichen funktionellen Dateien, die zuvor auf Bewegungsartefakte untersucht wurden, zeitlich korrigiert. Das bedeutet, dass die Signalkurve und ihre Parameter über die Zeit korrigiert wurden (= *temporal data smoothing*). Im Zuge dessen wurde die Signalkurve mittels eines Hochpassfilters und eines Tiefpassfilters zeitlich geglättet und das Signal-Rausch-Verhältnis somit verbessert. Für die Berechnungen wurden nur Frequenzen in einem bestimmten Hertz-Bereich zugelassen (designabhängig), da sehr hohe und sehr niedrige Frequenzen normalerweise hohe Rauschanteile enthalten (vgl. Handbuch Brain Voyager 2000). Außerdem wurden lineare Trends entfernt (= *linear trend removal*). Diese zeitliche Glättung erhöht durch den Einsatz von Filtern die Zuverlässigkeit späterer statistischer Tests (vgl. Friston, 2004).

5.7.2.5 Erstellen einer anatomischen Datei zur Zuordnung von Aktivierungen zu anatomischen Strukturen

Im nächsten Schritt wurde eine Datei der anatomischen Rohdaten (*.vmr*-files) erstellt. Dieses dreidimensionale, T1-gewichtete Bild dient als Grundlage der Zuordnung von funktionellen Aktivierungen zu anatomischen Strukturen. Abbildung 5.13 zeigt das Erstellen des eben beschriebenen *anatomical 3D data set*. In Abbildung 5.14 ist das Resultat, ein anatomisches Bild, zu sehen.

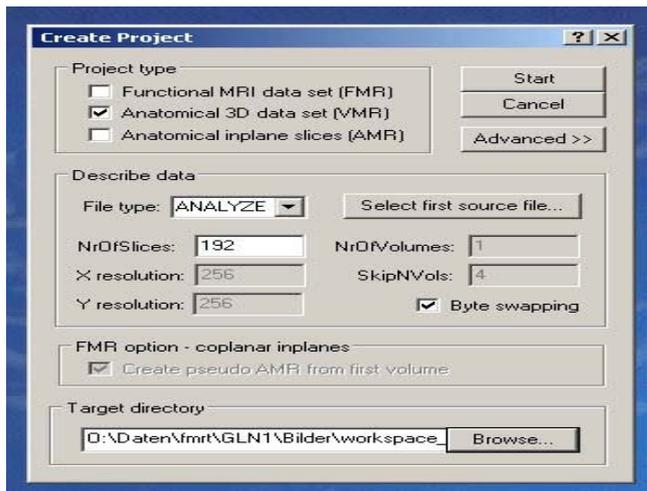


Abbildung 5.13: Parameterfestlegung zur Erstellung eines anatomischen Bildes (Anzahl der Schichten in einer T1-gewichteten Aufnahme: 192) (Quelle: Brain Voyager 2000)

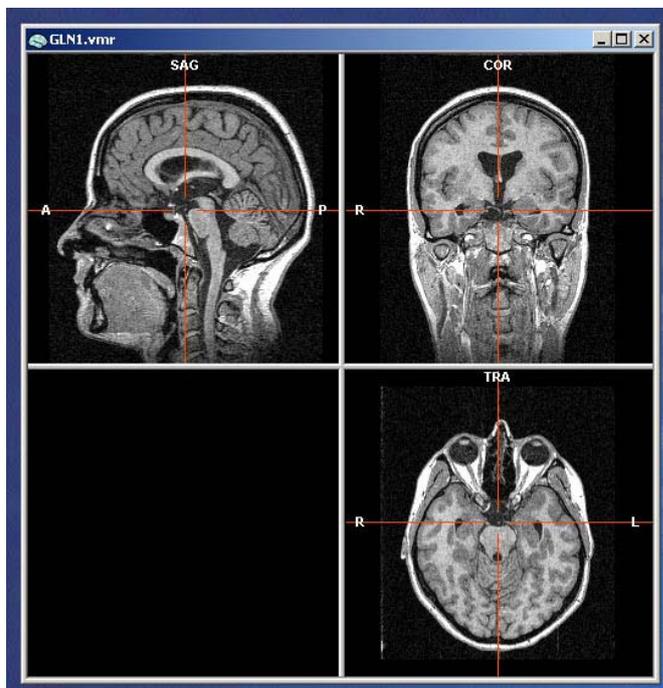


Abbildung 5.14: Erstelltes dreidimensionales, anatomisches Bild (T1-gewichtet) (Quelle: Brain Voyager 2000)

5.7.2.6 Verknüpfung und Übereinanderlegung des funktionellen Bildes und des anatomischen Bildes zur genauen Lokalisation von Aktivierungen

Im Anschluss an diesen Schritt wurde zu dem gerade entstandenen anatomischen Bild ein funktionelles Bild geöffnet. Dann wurden die am Anfang beschriebenen Positionsfiles für eine anatomische und eine funktionelle Bilddatei geladen (vgl. Abbildung 5.15). Ziel dieser Co-Registrierung war das Übereinanderlegen des funktionellen und des anatomischen Bildes. Diese Vorgehensweise sicherte die für spätere Berechnungen notwendige exakte Bestimmung anatomischer Strukturen bei der Lokalisation von funktionellen Aktivierungen. Zur Optimierung der deckungsgleichen Lage des anatomischen und funktionellen Bildes wurden manuelle Korrekturen durchgeführt. Hierzu wurden Stauchungen, Streckungen und Verschiebungen der Bilder in alle drei Raumrichtungen vorgenommen. Die Abbildung 5.16 zeigen beispielhaft ein ungenau (A) und ein genau korrigiertes (B) Übereinanderlegen beider Bilder.

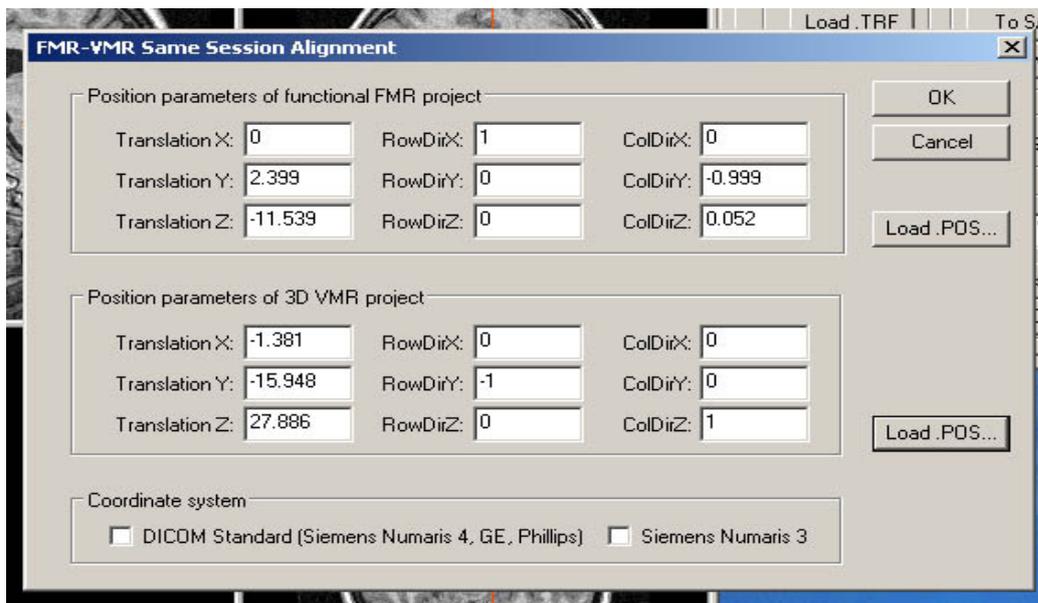


Abbildung 5.15: Laden des anatomische Positionsfiles (*ana.pos*) und des funktionellen Positionsfiles (*func.pos*) (Quelle: Brain Voyager 2000)

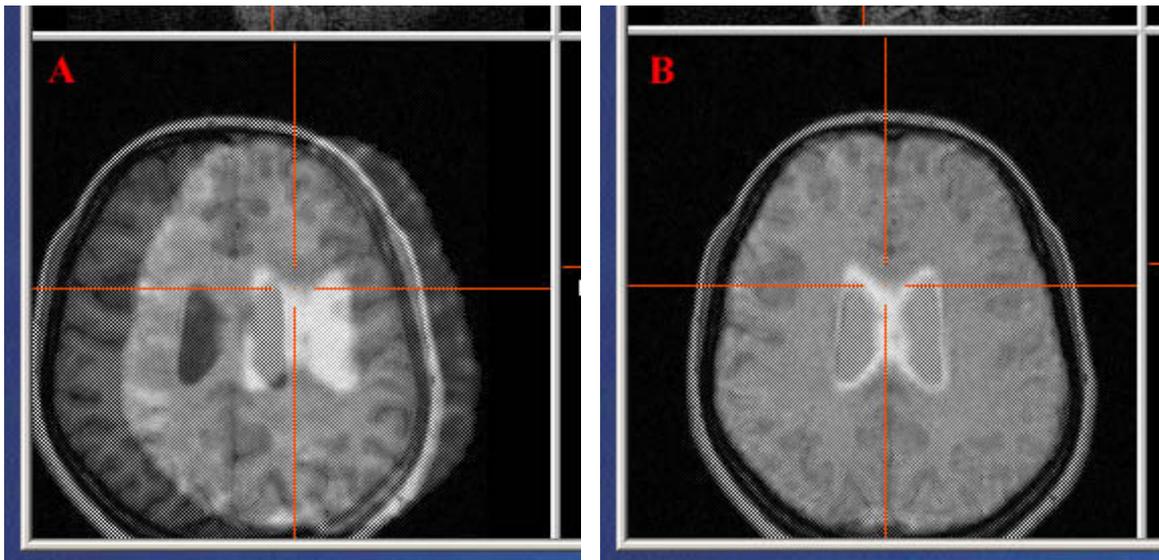


Abbildung 5.16: **A** Beispiel für ein ungenaues Übereinanderlegen eines anatomischen (dunkelgrau, scharf) und funktionellen Bildes (hellgrau, verschwommen) **B** Beispiel für ein genaues Übereinanderlegen eines anatomischen und funktionellen Bildes (Quelle: Brain Voyager 2000)

5.7.2.7 Standardisierung der anatomischen Bilder zur Übereinstimmung mit dem Referenzgehirn mittels manueller Korrektur an zehn Referenzpunkten

Der nächste Schritt war einer der wichtigsten Abschnitte in der Standardisierung und Transformierung der Rohdaten. Dabei wurden die Koordinaten des anatomischen Bildes den standardisierten Koordinatenpunkten zugeordnet. Durch diesen Vorgang konnten die Bilder dann in den standardisierten Talairach-Raum überführt werden.

Das von Talairach & Tournoux (1988) standardisierte und in Brain Voyager 2000 verwendete Koordinatensystem setzt sich aus drei Ebenen zusammen, die in Abbildung 5.17 (a) dargestellt sind. Der Koordinatenursprung aller drei Ebenen liegt in der *anterioren Kommissur* (= AC). In Abbildung 5.17 (b) ist als Orientierungshilfe die Bezeichnung der Raumrichtungen zu sehen.

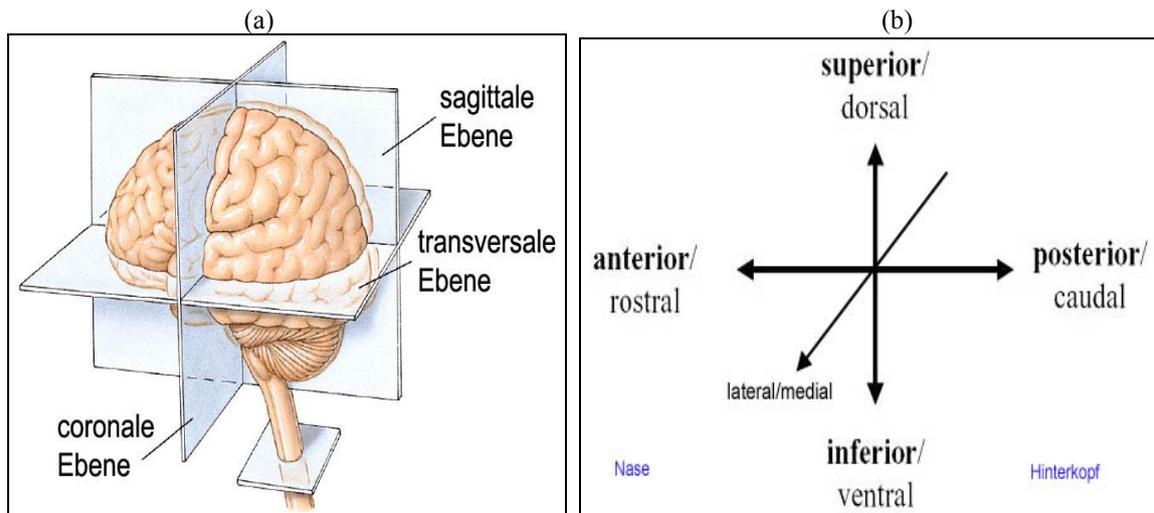


Abbildung 5.17: a Übersicht der drei Ebenen im standardisierten Talairach-Raum (Quelle: Birbaumer & Schmidt, 2003; Kap. 9) b Bezeichnung der Raumrichtungen (eigene Darstellung)

Zum Zwecke einer möglichst genauen Übertragung des individuellen Gehirnes auf das Referenzgehirn wurden zunächst manuell AC und PC bestimmt (AC = anteriore Kommissur und PC = posteriore Kommissur), wie in Abbildung 5.18 grafisch dargestellt ist. Im Anschluss wurden ebenfalls manuell acht weitere Referenzpunkte für die Übertragung des Gehirnes in den Talairach-Raum bestimmt (vgl. Abbildung 5.19).

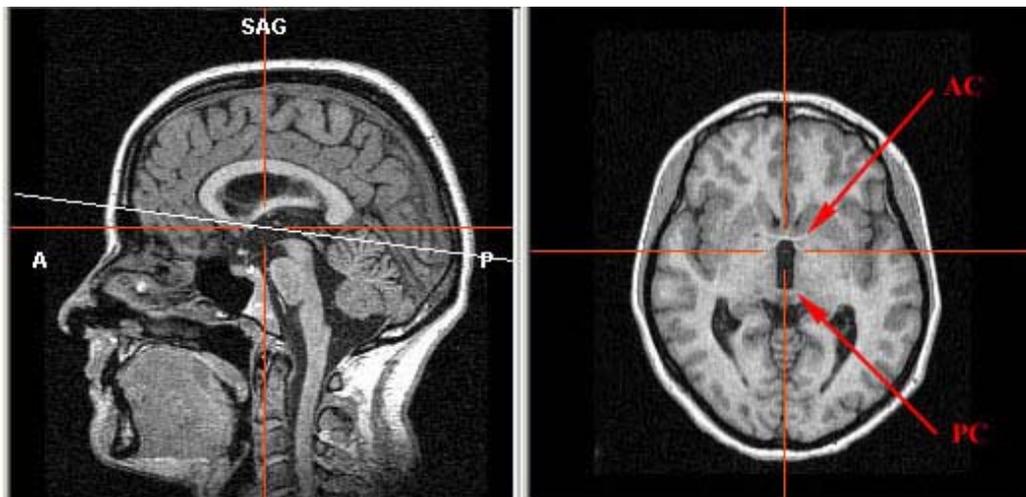


Abbildung 5.18: Bestimmung der anterioren Kommissur (= AC) und posterioren Kommissur (= PC) (Quelle: Brain Voyager 2000)

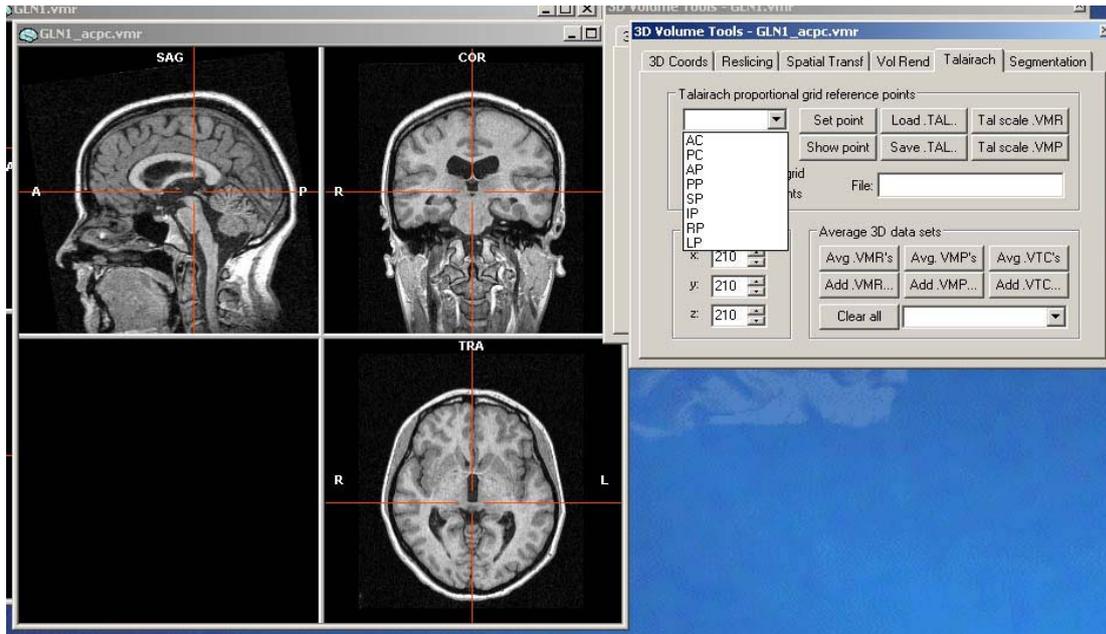


Abbildung 5.19: Bestimmung der acht Referenzpunkte zur Standardisierung des Gehirnes und exakten Ausmaßbestimmung des noch nicht bearbeiteten Gehirnes (Quelle: Brain Voyager 2000)

In Tabelle 5.5 sind die definierten Referenzebenen des Talairach-Koordinatensystems aufgeführt. Nach Abschluss dieses Schrittes waren die anatomischen Bilder an das Standardgehirn angepasst. Die Positionswerte aller Referenzpunkte wurden gespeichert. Diese Sicherung der manuell festgelegten Referenzpunkte diente entsprechend auch der Standardisierung der funktionellen Daten. Die festgelegten Punkte wurden vom Programm automatisch auf die funktionellen Daten übertragen. Mithilfe dieses Schrittes wurden die anatomischen und funktionellen Bilder des Gehirnes nach den gleichen Maßgaben bezüglich des Referenzgehirnes standardisiert.

Tabelle 5.5: Referenzebenen des TALAIRACH-Koordinatensystems (modifiziert nach Halber, 1995)

1.	Die bikommissurale axiale Ebene (AC-PC) durch den Oberrand der vorderen Kommissur (= AC) und den Unterrand der hinteren Kommissur (= PC),
2.	die midsagittale Ebene,
3.	die coronale Ebene durch den Hinterrand der vorderen Kommissur (= VAC),
4.	die coronale Ebene durch den Hinterrand der hinteren Kommissur (= VPC),
5.	die coronale Ebene durch den äußersten rostralen Punkt (= AP),
6.	die coronale Ebene durch den äußersten kaudalen Punkt (= PP),
7.	die axiale Ebene durch den äußersten dorsalen Punkt (= SP),
8.	die axiale Ebene durch den äußersten ventralen Punkt (= IP),
9.	die sagittale Ebene durch den äußersten rechten lateralen Punkt (= RP) und
10.	die sagittale Ebene durch den äußersten linken lateralen Punkt (= LP).

5.7.2.8 Verknüpfung des funktionellen Bildes mit dem anatomischen Bild und Erstellen der zeitlichen Reihenfolge aller funktionellen Bilder

Nach Abspeicherung des in den Talairach-Raum transformierten anatomischen Bildes wurden die funktionellen Daten mit diesem verknüpft. (vgl. Abbildung 5.20).

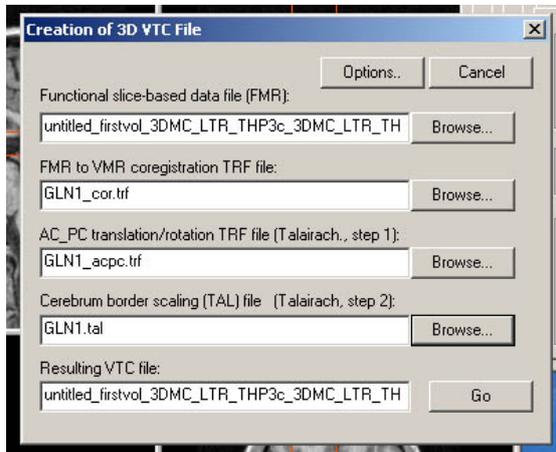


Abbildung 5.20: Verknüpfung von funktionellen und anatomischen Daten (Quelle: Brain Voyager 2000)

Außerdem wurden Daten-Zeitreihen erstellt (= *voxel time courses* = *vtc.files*), welche die zeitliche Reihenfolge der funktionellen Dateien festlegten und Signalintensitäten enthielten. Ziel dieses Vorganges ist, dass der reale Aktivitätsverlauf mit dem vorher postulierten Aktivitätsverlauf verglichen werden kann. Der Versuchleiter postuliert im Vorfeld, dass es nach der Darbietung eines Stimulus zu einem Anstieg der BOLD-Kurve kommt (vgl. Abschnitt 5.1.4 und 5.1.5) und legt die Zeitpunkte, in denen es zum Anstieg kommt, in einem Modell fest. Die Daten-Zeitreihen (*vtc.files*) enthalten den tatsächlichen Zeitverlauf der Aktivität. Dieser Zeitverlauf kann dann mit der postulierten BOLD-Kurve verglichen werden. Abbildung 5.21 zeigt ein solches Modell, in dem der zeitliche Verlauf des BOLD-Signales vorher festgelegt wurde.

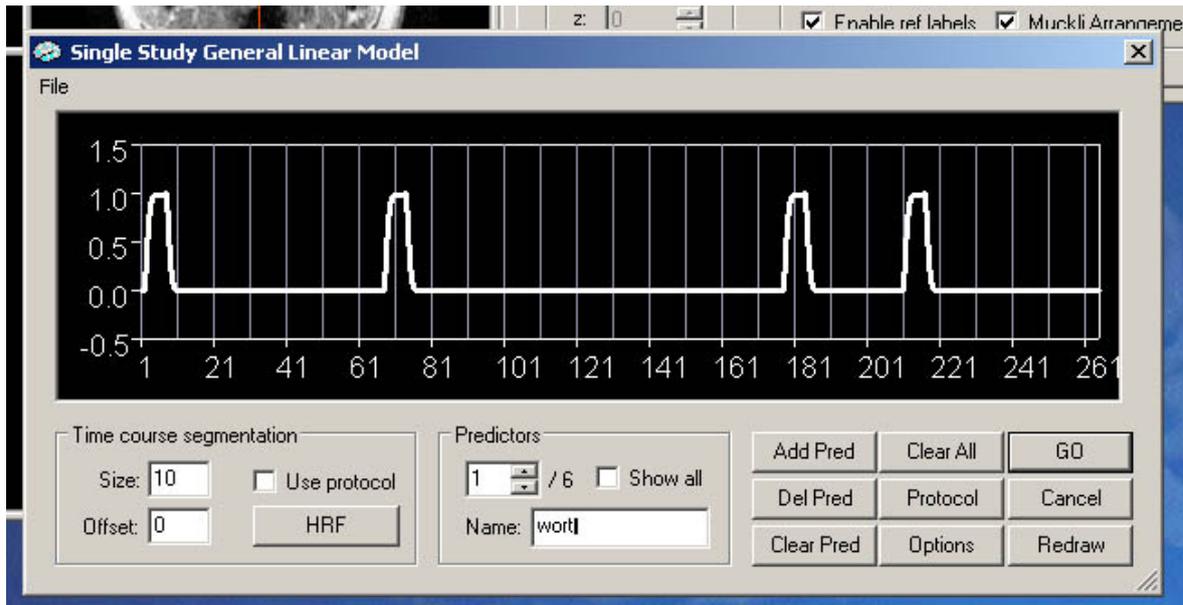


Abbildung 5.21: Postulierter, zeitlicher Verlauf der BOLD-Kurve anhand eines event-Protokolls. (Quelle: Brain Voyager 2000)

Mithilfe eines während der fMRT-Messung mitgeführten *event-Protokolls* (= Stimuliprotokoll) konnten die einzelnen Scans (= Volumes) den einzelnen Prädiktoren (= zur Vorhersage eines Merkmals herangezogene Variablen; hier: die sechs verschiedenen Kategorien) zugeordnet werden (vgl. Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Stimuliprotokoll für das Bilder- und Tappingparadigma

Bilderparadigma		Tappingparadigma	
fortlaufende Scan-Anzahl	Kategorie (event)	fortlaufende Scan-Anzahl	Kategorie (event)
1-4	Ruhe (Fixationskreuz)	1-4	Ruhe (Fixationskreuz)
5-10	Wörter	5-10	Daumen
11-15	Ruhe (Fixationskreuz)	11-15	Ruhe (Fixationskreuz)
16-21	Gebärden mit Pfeil	16-21	Kleiner Finger
22-26	Ruhe (Fixationskreuz)	22-26	Ruhe (Fixationskreuz)
27-32	Gesten	27-32	Daumen
33-37	Ruhe (Fixationskreuz)	33-37	Ruhe (Fixationskreuz)
38-43	Gebärden statisch	38-43	Kleiner Finger
44-48	Ruhe (Fixationskreuz)	44-48	Ruhe (Fixationskreuz)
49-54	Gebärden ohne Pfeil	49-54	Daumen
55-59	Ruhe (Fixationskreuz)	55-59	Ruhe (Fixationskreuz)
60-65	Objekte	60-65	Kleiner Finger
66-70	Ruhe (Fixationskreuz)	66-70	Ruhe (Fixationskreuz)
71-76	Wörter	71-76	Daumen
77-81	Ruhe (Fixationskreuz)	77-81	Ruhe (Fixationskreuz)
82-87	Gebärden ohne Pfeil	82-87	Kleiner Finger
88-92	Ruhe (Fixationskreuz)	88-92	Ruhe (Fixationskreuz)
93-98	Objekte	93-98	Hand
99-103	Ruhe (Fixationskreuz)	99-103	Ruhe (Fixationskreuz)
104-109	Gebärden statisch	104-109	Hand
110-114	Ruhe (Fixationskreuz)	110-114	Ruhe (Fixationskreuz)
115-120	Gebärden mit Pfeil	115-120	Hand
121-125	Ruhe (Fixationskreuz)	121-125	Ruhe (Fixationskreuz)
126-131	Gesten	126-131	Hand
132-136	Ruhe (Fixationskreuz)	132-136	Ruhe (Fixationskreuz)
137-142	Gebärden statisch		
143-147	Ruhe (Fixationskreuz)		
148-153	Gesten		
154-158	Ruhe (Fixationskreuz)		

159-164	Gebärden ohne Pfeil
165-169	Ruhe (Fixationskreuz)
170-175	Objekte
176-180	Ruhe (Fixationskreuz)
181-186	Wörter
187-191	Ruhe (Fixationskreuz)
192-197	Gebärden mit Pfeil
198-202	Ruhe (Fixationskreuz)
203-208	Gebärden statisch
209-213	Ruhe (Fixationskreuz)
214-219	Wörter
220-224	Ruhe (Fixationskreuz)
225-230	Objekte
231-235	Ruhe (Fixationskreuz)
236-241	Gebärden ohne Pfeil
242-246	Ruhe (Fixationskreuz)
247-252	Gebärden mit Pfeil
253-257	Ruhe (Fixationskreuz)
258-263	Gesten
264-268	Ruhe (Fixationskreuz)

5.7.2.9 Räumliche Glättung der funktionellen Daten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Im letzten Schritt wurden die funktionalen Daten räumlich geglättet (= *spatial data smoothing*). Dieser Teil der Vorverarbeitung der Daten diente, wie auch schon die zeitliche Glättung, der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Durch die räumliche Glättung wurde die Verknüpfung von Bildpunkten mit benachbarten durchgeführt (vgl. Abbildung 5.22). Diese wurde mit einer speziellen *Gauss'schen Filtermaske* realisiert. Für das Bilderparadigma wurde ein Filter von 8 mm festgelegt. Für das Motorik-Paradigma hingegen lag die Grenze bei 6 mm, da es sich um ein deutlich kleineres Areal handelte und so die Sensitivität des festgelegten Clusters (Cluster = alle zusammenhängenden Voxel in einem definierten Areal) erhöht werden sollte. Die räumliche Glättung sollte interindividuelle Unterschiede in der Lage anatomischer Strukturen verringern, und somit die Validität (= Gültigkeit) der statistischen Analyse sichern (vgl. Friston, 2004).

Nach Abschluss aller eben beschriebenen Schritte konnten die Daten statistisch weiterverarbeitet werden, wie es in Abschnitt 5.7.4 beschrieben wird.

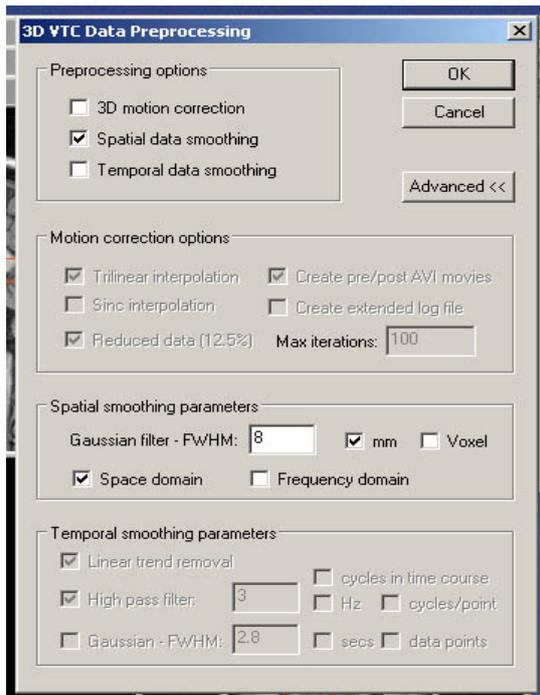


Abbildung 5.22: Räumliche Glättung der Daten. Festgelegte Filtermaske für das Bilderparadigma: 8 mm. Festgelegte Filtermaske für das Motorik-Paradigma: 6 mm. (Quelle: Brain Voyager 2000)

5.7.3 Grenzen in der Datenaufbereitung mit *Brain Voyager 2000*

Folgende Faktoren sind bei der Datenaufbereitung verschiedener Gehirne begrenzend für die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung:

- Unterschiede in der Hirngröße und Hirnform zwischen den Versuchspersonen.
- Interindividuelle Unterschiede in der Lage des Gehirnes in Relation zum Schädel und Verzerrungen durch Standardisierung.
- Schlecht erkennbare Identifikationspunkte bei einzelnen Versuchspersonen (z. B. Bestimmung der AC/PC-Linie) (vgl. Halber, 1995).

Es muss bedacht werden, dass es bei der Standardisierung der Gehirne mittels der oben beschriebenen zehn Punkte zu interindividuellen Abweichungen kommen kann, da sich die Gehirne voneinander unterscheiden. Allein die manuelle Anpassung der Gehirne durch den Versuchsleiter nach den oben beschriebenen zehn Punkten birgt das Risiko, dass das Standardgehirn von Brain Voyager 2000 und das Gehirn der Versuchsperson nicht optimal übereinstimmen. Eine exakte, millimetergenaue Zuordnung anatomischer Strukturen zu Aktivierungen kann aus diesem Grund nicht gewährleistet werden. Um deutliche Abweichungen bei der Standardisierung der Gehirne zu vermeiden, sollte der

Versuchsleiter entweder alle Gehirne nach den gleichen Maßgaben standardisieren oder es sollte jede Standardisierung von einer zweiten, fachkundigen Person wiederholt werden. Insbesondere bei Aktivierungen mit geringer Clustergröße ist eine zuverlässige Aussage zur anatomisch-korrekten Struktur schwer zu treffen. Aus diesem Grund sollten Cluster definiert werden, die eine gewisse Voxelanzahl umfassen, um statistische Effekte zu stabilisieren. Als Konsequenz wurden deswegen bei der Auswertung dieser Studie zusammenhängende Cluster von drei Voxeln mit je einer Voxelgröße von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ definiert.

5.7.4 Statistische Weiterverarbeitung der Daten

Nachdem die individuellen Gehirne dem standardisierten Referenzgehirn angepasst wurden, mussten die Daten des experimentellen Designs statistisch bewertet werden. Dazu sollten die Daten auf Effekte untersucht werden, die durch die Prädiktoren verursacht wurden. Im Folgenden wurde zunächst im Programm *Brain Voyager 2000* ein Modell erstellt, welches anhand der tatsächlichen Daten geprüft wurde. In Abbildung 5.23 ist beispielhaft das Modell für die sechs Kategorien des Bilderparadigmas zu sehen.

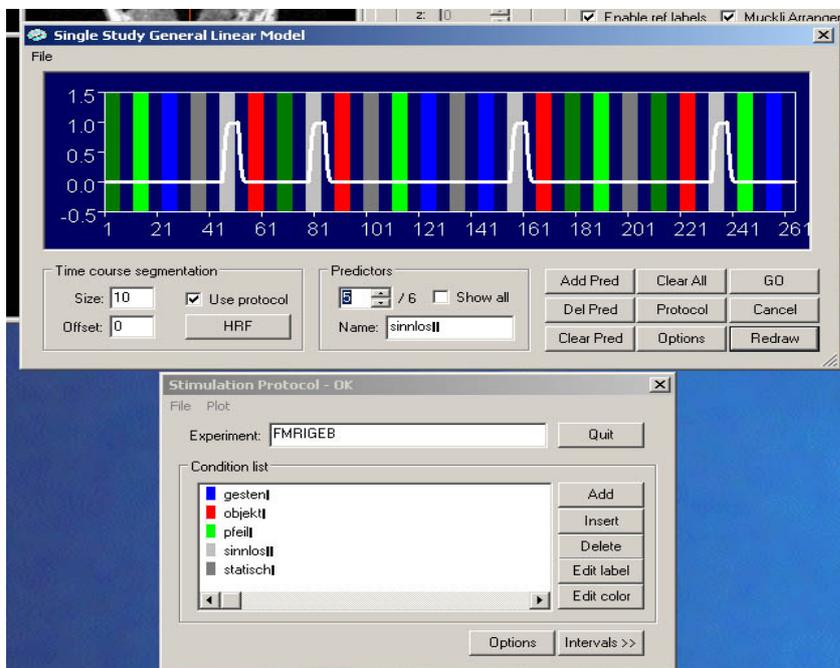


Abbildung 5.23: Darstellung des erstellten Modells, auf dessen Basis geprüft wird, wie gut das postulierte Modell mit den sechs Kategorien die vorliegenden Daten beschreibt. (Quelle: Brain Voyager 2000)

Die Prüfgröße F prüfte, in welchem Umfang das aufgestellte Modell die experimentell gewonnenen Daten beschrieb. Damit konnte ausgesagt werden, wie gut die abhängigen Variablen (= Signalintensität, die den Blutfluss anzeigt) die Prädiktoren (= die Kategorien) des Modells erklären. Das bedeutet, dass die hier aufgestellten Hypothesen in Form von Parametern im Modell umgesetzt wurden, dann die Voxelanzahl ermittelt wurde und schließlich vom Programm mithilfe der Prüfgröße t statistisch auf einem festgelegten Niveau abgesichert wurde. Die Voxel, die das festgelegte Signifikanzniveau überschritten, wurden in die weiterführende Analyse aufgenommen. Für diese Untersuchung bedeutete das, dass die Voxel, die statistisch bedeutsam wurden ($p < .005$ bzw. $p < .001$) in die Berechnungen einbezogen wurden.

Mithilfe des Programms *Brain Voyager 2000* wurde ein voxelorientiertes Verfahren auf der Basis eines *Allgemeinen Linearen Modells* (= ALM) durchgeführt (vg. Friston, 2004). Das ALM wurde im hier vorliegenden Fall in Form einer multiplen Regression durchgeführt. In einem ALM werden unter anderem Varianz-, Regressions- und Korrelationsanalysen vereinigt. Das ALM beruht auf der Analyse nominalskalierter Merkmale (vgl. Bortz, 1999). Es überprüft, von welchen Einflussgrößen eine Zielgröße abhängt. Die grundlegende Modellannahme lautet: die Werte der abhängigen Variable ergeben sich als gewichtete Summe der Werte der unabhängigen Variablen (vgl. Bortz, 1999). In diesem Fall wurden die sechs verschiedenen Kategorien im Bilderparadigma und die drei verschiedenen, vorgegebenen Bewegungsmöglichkeiten (Finger, Daumen, Hand) im Motorikparadigma als *unabhängige* Variablen angenommen, die systematisch variiert wurden. Die *abhängige* Variable wurde durch die Signalintensität (= verschiedene Aktivierungen im gleichen definierten ROI) oder den Ort der Aktivierung (= vergleichbare Signalintensitäten in verschiedenen ROI) beschrieben. Die Gleichung für das *Allgemeine Lineare Modell* lautet wie folgt:

$$Y_{ij} = \beta_{1j} * X_{i1} + \beta_{2j} * X_{i2} + \dots + \beta_{kj} * X_{ik} + \varepsilon_{ij}$$

Formel 5.1

Formel zur Berechnung des Allgemeinen Linearen Modells

Zeichenerklärung:

i = Nummer des Volumes

j = Nummer des Voxels

k = Anzahl der Prädiktoren

β = geschätzte Gewichte

ε = Fehlergröße

Y = Regressand (wird vorhergesagt)

X = Regressor (sagt vorher)

In *Brain Voyager* sind Tests zur Prüfung der Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität nicht implementiert. Da das ALM aber ein Verfahren ist, welches sich robust gegenüber möglichen Verletzungen dieser Voraussetzungen verhält, ergeben sich keine weiteren Einschränkungen für die Datenauswertung.

Die Signalintensität des aktivierten Voxels wird durch den Regressand Y_{ij} beschrieben. Der Regressor X_{ik} stellt die Aktivierungen durch jede Bedingung dar (hier: Prädiktoren = sechs verschiedene im Bilderparadigma bzw. drei verschiedene im Motorikparadigma). Der für eine Analyse interessierende Prädiktor wird gewichtet, wogegen alle anderen Prädiktoren durch den zugeordneten β -Wert „0“ nicht gewichtet werden. Mit dem Ablauf aller Bedingungen war die Aufzeichnung der laufenden Volumes (i) verbunden. Die Zuordnung aller verschiedenen Stimulationsbedingungen zu den fortlaufenden Volumes erfolgte über ein so genanntes und bereits in Kapitel 5.7.2.8 beschriebenes Stimuliprotokoll. Aus diesem wurde eine Designmatrix erstellt, in der das Paradigma und die Abfolge der Stimulationsbedingungen kodiert waren. Die Designmatrix dient dann den Berechnungen, die das vorher postulierte Modell vorhersagen. Das Modell gibt den angenommenen Verlauf des Blutflusses an. Ein solches Modell zeigt die Abbildung 5.21 in Abschnitt 5.7.2.8. Die sechs verschiedenen Prädiktoren („Gebärden statisch“, „Gebärden mit Pfeil“, „Objekte“, „Gesten“, „Gebärden ohne Pfeil“, „Wörter“) bzw. drei verschiedenen Prädiktoren („Kleiner Finger“, „Daumen“, „Hand“) wurden als Stimuli-Bedingungen festgelegt. In Abbildung 5.24 sind die sechs Prädiktoren des Bilderparadigmas und die dadurch ausgelösten Aktivierungen beispielhaft verdeutlicht.

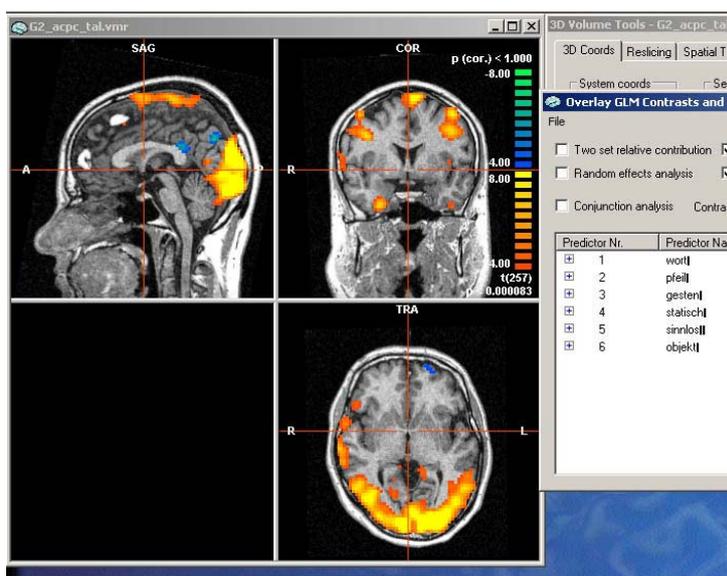


Abbildung 5.24: Durch die sechs Prädiktoren ausgelöste Aktivierungen in einem Gehirn eines Probanden. (Quelle: Brain Voyager 2000)

Alle Volumes, in denen dagegen ein Fixationskreuz (= Kontrollbedingung) dargeboten wurde, waren als Baseline-Bedingungen kodiert. Die Regressionsgewichte β_{kj} waren unbekannte Parameter, die in Bezug auf die Voxel geschätzt wurden und den Regressor X_{ik} wichteten. Sie beschreiben den relativen Einfluss der Prädiktorvariablen auf die hämodynamische Antwort eines Voxels. Die Fehlergröße ε_{ij} (= Residuum) erklärt die Abweichung der Werte des Regressanden Y_{ij} vom postulierten Modell. Da im Allgemeinen Linearen Modell, aufgrund vieler Messwiederholungen in einem geringen Zeitfenster, nicht gewährleistet werden konnte, dass die Fehlergrößen voneinander unabhängig sind, mussten die Freiheitsgrade des ALM korrigiert werden (vgl. Kiebel & Holmes, 2004). Im ALM wird von der Nullhypothese (= H_0) ausgegangen. Das bedeutet, dass angenommen wird, dass die Prädiktoren keinen Einfluss auf das entstandene Signal haben. Anhand der Prüfgröße F wird getestet, wie wahrscheinlich der Einfluss der Prädiktoren unter Gültigkeit der H_0 ist. Dabei ist das Ziel, die Alternativhypothese (= H_1) anzunehmen und somit zu bestätigen, dass die Prädiktoren Einfluss haben. Es können durch diese Herangehensweise Unterschiede zwischen Prädiktoren, Gruppen oder untersuchten Hirnregionen geprüft werden. In Ausnahmen kann H_1 verworfen werden, so z. B., wenn keine Unterschiede zwischen zwei Gruppen bezüglich eines Prädiktors vorliegen. In der vorliegenden Untersuchung war diese Herangehensweise teilweise nötig.

In der Analyse der Ergebnisse der fMRT-Untersuchung wird zunächst davon ausgegangen, dass Voxel beim Sehen eines Bildes in einer bestimmten Struktur gegenüber der Baseline aktiviert werden. Dann können aufgrund dieses Vorwissens Analysen auf Gruppen- oder Einzelpersonenbasis durchgeführt werden.

Als Ansatz für die gesamte Analyse der Daten des *Bilderparadigmas* wurde eine voxelorientierte Random-Effect-Analyse (Abschnitt 5.7.4.1) auf Gruppenebene durchgeführt. Für die Daten des *Motorikparadigmas* fand dagegen eine voxelorientierte Fixed-Effect-Analyse (Abschnitt 5.7.4.2) auf der Basis von einzelnen Versuchspersonen (= so genannte Multi-Subjekt-Vergleiche) statt. Die Analyse der fMRT-Daten mittels dieser Modelle beinhaltet die Prüfung der Übereinstimmung eines modulierten Modells an die beobachteten Daten. Es wird geprüft, wie viel Varianz des Regressanden Y_{ij} die Prädiktoren vorhersagen.

5.7.4.1 Random-Effect-Analyse

Bei einer *Random-Effect-Analyse* wird wie bei allen statistischen Verfahren davon ausgegangen, dass der Effekt (statistisch bedeutsame Aktivierung durch einen Prädiktor) in der Gesamtpopulation nur geschätzt werden kann. Des Weiteren können die einzelnen Versuchspersonen unterschiedliche Anteile an dem Gruppeneffekt haben. Aus diesem Grund wird zunächst der Effekt bei jeder Versuchsperson berechnet. Bei dieser Herangehensweise wird zusätzlich angenommen, dass auftretende Fehler zwischen den Versuchspersonen nicht systematisch sind. In einem weiteren Schritt wird der Effekt der Gruppe aus den bereits ermittelten Effekten der einzelnen Versuchspersonen geschätzt. Als Folge entsteht ein geschätzter Gruppeneffekt, der sich aus den berechneten Einzel-Effekten der Versuchspersonen und Fehlertermen zusammensetzt. Die Einzel-Effekte gehen dabei gewichtet ein, was ein konservatives Testen der Effekte gewährleistet (vgl. Penny & Holmes, 2004). Mit diesem Vorgehen kann garantiert werden, dass der Gruppeneffekt nicht auf sehr hohen oder sehr niedrigen Ausreißer-Werten beruht. Es sei an dieser Stelle allerdings kritisch angemerkt, dass eine große Stichprobe einen besseren Einfluss auf die Güte des Gruppeneffektes hat als eine geringe. Da die Stichprobenumfänge dieser Studie mit 8 – 12 Versuchspersonen relativ gering sind, muss bei allen berechneten Effekten dieses Problem der Effekt-Güte berücksichtigt werden (vgl. Penny & Holmes, 2004).

Die mit dieser Analyse berechneten Werte wurden durch die Prüfgröße t auf Signifikanz geprüft. Die inhaltlichen Hypothesen wurden durch das Postulieren von Kontrasten zwischen verschiedenen Prädiktoren operationalisiert und auf einem vorher festgelegten Signifikanzniveau getestet. Alle Voxel mit einem signifikanten t -Wert wurden grafisch auf dem entsprechenden Gehirnbild dargestellt. Durch den Einsatz spezifischer Filter kann die kortikale Aktivierung auf die Hirnoberfläche projiziert werden. In den hier durchgeführten Analysen werden allerdings nur alle positiv-aktivierten Voxel dargestellt, um bei allen Diskussionen nur höhere Aktivierungen zu interpretieren. Eine im Vergleich zur Baseline geringere Aktivierung (es werden die Voxel signifikant, die eine stärkere Abnahme der Blutflusskurve gegenüber der kontrastierten Bedingung aufweisen) entsprach nicht den aufgestellten Hypothesen. Es wurden also alle Voxel angezeigt, die bei einer ausgewählten Bedingung signifikant stärker aktiviert waren, als unter der kontrastierten Bedingung. Im Anschluss an diese Berechnungen wurde jeder Kontrast in umgekehrter Richtung erneut auf positiv-aktivierte Voxel geprüft, um die stärkeren Aktivierungen in beide Richtungen zu verdeutlichen. Die Interpretation einzelner Voxel ist nicht sinnvoll. Deswegen wurden

im Vorfeld, entsprechend den Hypothesen, Regionen definiert. Diese Betrachtung ganzer Regionen anstelle einzelner Voxel gewährleistet, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlern erster Art minimiert wird. Eine genauere Beschreibung folgt an einer späteren Stelle in diesem Abschnitt. Auf diese a priori festgelegten *Regions of interest* (= ROI), in denen anatomisch sinnvolle Voxelverbände zusammengefasst wurden, bezog sich die Analyse. Die Anzahl der ROI waren je nach Fragestellung und Hypothese verschieden. Ein *Voxel* hatte in der statistischen Analyse und als Rohdatei eine *Größe* von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$. Für die grafische Darstellung der Aktivierungen wurden diese von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ auf $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ interpoliert. Folglich bestand ein Voxel dieser Berechnungen aus 27 $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ -Voxeln. Für alle weiterführenden Analysen wurde ein *cut off* von drei zusammenhängenden Voxeln (drei $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ -Voxel) angesetzt. Das bedeutet, dass alle Aktivierungen unter 81 zusammenhängenden Voxeln à $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen wurden. Dadurch sollten zufällige Spontanaktivierungen ausgeschlossen und der Schwerpunkt auf stark aktivierte Areale gelegt werden. Somit sollten falsch-positive Ergebnisse, also Fehler erster Art, ausgeschlossen werden. Der Ausdruck „Fehler erster Art“ bedeutet, dass man einen Unterschied in den Daten annimmt, obwohl keiner vorhanden ist. Da dieser „Fehler erster Art“ bezüglich der hier formulierten Fragestellung schwerwiegender ist, als das Übersehen eines tatsächlich vorhandenen Unterschiedes, wird die Wahrscheinlichkeit von Fehlern erster Art durch die eben beschriebenen Maßnahmen verringert.

Für die Random-Effect-Analyse wurde ein α von *0.005 (2-seitig, unkorrigiert)* als Entscheidungskriterium für ein statistisch signifikantes Ergebnis festgelegt, um Effekte konservativ zu testen. Dieses konservative Niveau wurde gewählt, um die Wahrscheinlichkeit für Fehler erster Art so gering wie möglich zu halten. Das bedeutet, dass ein Ergebnis eine Wahrscheinlichkeit $p < .005$ unter Gültigkeit von H_0 haben muss, um statistisch bedeutsam zu werden.

5.7.4.2 Fixed-Effect-Analyse

Die Analyse der Daten des Motorikparadigmas erfolgte mithilfe einer *Fixed-Effect-Analyse*. Diese Analyse-Form wurde der Random-Effect-Analyse vorgezogen, da die Lokalisationen der Aktivierungen sowie Aktivierungsumfänge jeder einzelnen Person interessierten. Bei dieser Analyse wird davon ausgegangen, dass jede Versuchsperson den

gleichen Anteil an der beobachteten Aktivierung hat. Folglich kann die Zwischen-Subjekt-Variabilität vernachlässigt werden. Es lassen sich also Aussagen über Aktivierungen einzelner Versuchspersonen machen, die sich aber nicht auf die gesamte Population zurückführen lassen, wie es bei einer Random-Effect-Analyse möglich ist. Bei einer Fixed-Effect-Analyse wird jede Versuchsperson gleichermaßen gewichtet. Das bedeutet, dass ein extremer „Ausreißer“ die gleiche Wichtigkeit in den Berechnungen erhält, wie eine Versuchsperson, deren Daten sich in Mittelfeld aller befinden, weshalb diese Analyse für Gruppenanalysen eher ungeeignet ist. Im Rahmen der Fixed-Effect-Analyse wurde für jede Versuchsperson automatisch ein so genannter Confound-Prädiktor für jede Bedingung im Modell eingeführt, da sich das mittlere Niveau der einzelnen Voxel zwischen den Versuchspersonen unterscheidet. Dieser Confound-Prädiktor ist ein konstanter Term und beschreibt das Signal-Level der einzelnen Versuchspersonen.

Als Entscheidungskriterium für ein statistisch signifikantes Ergebnis wurde, im Gegensatz zur Random-Effect-Analyse, ein α von 0.001 (2-seitig, unkorrigiert) festgelegt. Hier muss ein Ergebnis also eine Wahrscheinlichkeit $p < .001$ unter Gültigkeit von H_0 haben, um statistisch bedeutsam zu werden. Dieses geringe α von 0.1% wurde gewählt, da die Fixed-Effect-Analyse nicht so konservativ ist wie die Random-Effect-Analyse, und daher die Gefahr einer vorschnellen Entscheidung für die Alternativhypothese besteht. Da die statistischen Tests für jede einzelne Versuchsperson wiederholt wurden, erfolgte eine automatische Korrektur des α -Niveaus nach Bonferroni, um der α -Fehler-Kumulierung (= Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für einen α -Fehler) gerecht zu werden. Die Kriterien für Voxelgröße und cut off galten für die Fixed-Effect-Analyse und die Random-Effect-Analyse gleichermaßen: Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, cut off: drei zusammenhängende Voxel.

5.7.5 Hypothesengeleitete Datenverarbeitung

Um die aufgestellten Hypothesen bezüglich verschiedener Fragestellungen statistisch abzusichern, wurden spezifische Kontraste gebildet. Dadurch konnte der Zusammenhang zwischen Einfluss eines Prädiktors und den sichtbaren, aktivierten Voxeln beschrieben werden. Wie gerade beschrieben, wurde ein Signifikanzniveau von $p < .005$ bzw. $p < .001$ festgelegt. Für weitere Berechnungen wurden nur Aktivierungen mit einer Mindestgröße von 81 ($1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$)-Voxeln zugelassen.

Die verschiedenen interessierenden anatomischen Strukturen wurden mithilfe der Talairach-Koordinaten als *Regions of interest* (= ROI) festgelegt. Es erfolgte für jeden

Kontrast nur die Einbeziehung der Cluster, die für die jeweilige Fragestellung relevant waren. Dabei dienten die beschriebenen *Regions of interest* der Bildung sinnvoller Hirnareale für jeden einzelnen Kontrast. Die Ergebnisse wurden grafisch dargestellt und somit die kortikale Aktivierung durch spezielle Filter auf einer Hirnoberfläche als Bild aller aktivierten Voxel veranschaulicht.

Für alle Berechnungen gilt, dass das Fixationskreuz vorab als Baseline-Bedingung festgelegt wurde. Diese ist in der Modellberechnung implizit mit einem Wert gekennzeichnet. Das bedeutet, dass der Prädiktor „Baseline-Fixationskreuz“ im Kontrast nicht ausdrücklich aufgeführt werden muss. Die berechneten Aktivierungen stellen also Aktivierungen dar, deren Höhe den implizit angenommenen Wert der Baseline überschreiten.

5.7.5.1 Datenanalyse für das Bilderparadigma

Aufgrund der in Kapitel 4 gebildeten Hypothesen wurden Unterschiede zwischen den Gruppen in den Aktivierungsmustern bezüglich verschiedener, vorher festgelegter Hirnareale erwartet. Es soll im Folgenden beispielhaft die Herangehensweise bei der Datenanalyse dargestellt werden.

Für ein Hirnareal wurden Unterschiede zwischen den Gruppen bezüglich einiger Kategorien erwartet, und in einer Hypothese formuliert. So wurde beispielsweise erwartet, dass die Aktivierungen für eine oder mehrere Kategorien für die Gehörlosen (GL) gegenüber der hörenden Kontrollgruppe (K1) signifikant erhöht sind. Der zweite Paarvergleich zwischen Gebärdensprachdolmetschern (D) und der Kontrollgruppe 2 (K2) sollte ebenfalls statistisch bedeutsame höhere Aktivierungen auf Seiten der Gebärdensprachdolmetscher erbringen. Zur Prüfung der Hypothese wurde eine Random-Effect-Analyse auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.005$ durchgeführt.

Gegenstand der Fragestellung war also der Einfluss aller sechs Prädiktoren auf die Hirnaktivität in der interessierenden Region of interest (Hirnareal). Den sechs Prädiktoren wurde beim Vergleich *innerhalb einer Gruppe* jeweils der Wert [+1] im Einzelkontrast zur Baseline zugeordnet. Die Baseline (Fixationskreuz) ist im Modell implizit mit dem Wert [0] gekennzeichnet und muss aus diesem Grund nicht mehr ausdrücklich im Kontrast aufgeführt werden. Wird zwischen zwei Kategorien kontrastiert (z. B. *Wort* versus *Gesten*), erhält die eine Bedingung den Wert [+1] und die andere den Wert [-1]. Für einen Gruppenvergleich in diesem Beispiel wird der Gehörlosen-Gruppe der Wert [+1] und der Kontrollgruppe 1 der Wert [-1] zugeordnet. Dem Prädiktor, der von Interesse ist, wird

ebenfalls der Wert [+1] zugeordnet. Im Anschluss daran wird der Gruppenkontrast in entgegengesetzter Richtung durchgeführt (Gehörlose [-1] und Kontrollgruppe 1 [+1]; der Prädiktor bleibt [+1]), um somit nur die Voxel zu erhalten, die ausschließlich durch die Mehraktivierung der Gehörlosen gegenüber der Kontrollgruppe 1 erklärt werden. Da in die Analyse nur positive Beta-Gewichte eingehen, ist zu jedem Vergleich der Gegenvergleich notwendig. Die gleichen Analysen werden für das zweite gebildete Gruppenpaar Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 2 durchgeführt.

Kontrastiert man zwei Gruppen oder zwei Kategorien gegeneinander, so bekommt die Bedingung A den Wert [+1] und die Bedingung B den Wert [-1] zugeordnet. Das bedeutet verallgemeinert, dass die Aktivierung der Bedingung B von der Aktivierung der Bedingung A abgezogen wird, und somit nur noch die signifikant höhere Aktivierung durch die Bedingung A gegenüber der Bedingung B dargestellt ist.

5.7.5.2 Datenanalyse für das Motorikparadigma

Da es nur eine Analyse bezüglich des Motorikparadigmas gab, wird die Herangehensweise am Inhalt orientiert dargestellt.

Um zu klären, ob die Repräsentationsareale der Hände bei den Personen, die Gebärdensprache im täglichen Umgang ausüben, vergrößert gegenüber denen sind, die keinen Kontakt mit Gebärdensprache haben, mussten die Aktivierungsumfänge vom Tapping aller Gruppen ermittelt werden. Da die Lokalisationen der Aktivierungsschwerpunkte auf dem Gyrus praecentralis ebenfalls von Interesse waren, wurde die Analyse auf der Basis von Einzelpersonen durchgeführt. Diese Fixed-Effect-Analyse erfolgte auf dem Signifikanzniveau $p = 0.001$. In diese einfaktorielle Varianzanalyse gingen nur positive Beta-Gewichte ein, was den Einfluss der Bewegungs-Prädiktoren auf die angezeigten Aktivierungen gegenüber motorischer Ruhe (Kontrollbedingung) anzeigt. Innerhalb der Analyse wurde jede Person einzeln betrachtet. Dazu wurde den Prädiktoren "Daumen", "Kleiner Finger" bzw. "Hand" für jede Versuchsperson je der Wert [+1] zugeordnet, und getrennt gegen die Baseline (= motorische Ruhe), welcher kein Wert zugeordnet wurde (da die Baseline implizit ist), kontrastiert. Aus den Berechnungen dieser Kontraste resultierten Cluster von Voxeln, deren Aktivierung allein durch den jeweiligen Prädiktor "Daumen", "Kleiner Finger" bzw.

“Hand“ erklärt wird. Es wurden keine Vergleiche zwischen den Gruppen bzw. zwischen den Prädiktoren durchgeführt.

Wie schon erwähnt, wurden bei allen Hypothesen bezüglich des Bilder- und Motorikparadigmas die statistisch bedeutsamen Cluster aufgrund ihrer Talairach-Koordinaten anatomischen Strukturen zugeordnet. Es wurden nur die Cluster dargestellt, die für die jeweilige Fragestellung von Bedeutung waren und eine Mindestgröße von drei $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ -Voxeln besitzen. Die Ergebnisse wurden dann als 3-D-Bilder auf der Hirnoberfläche dargestellt.

6 Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis

Im folgenden Ergebnisteil werden die Ergebnisse der unter Kapitel 5 3 dargestellten Untersuchungsmethode separiert nach den a priori festgelegten Regions of interest (ROI) dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse für das *Wernicke-Areal* (Abschnitt 6.1) und das *Broca-Areal* (Abschnitt 6.2) aufgezeigt. Darauf folgend werden die Ergebnisse zum *ventralen Pfad* (Abschnitt 6.3) und *Gyrus praecentralis* (Abschnitt 6.4) vorgestellt. Es wird versucht, die Ergebnisse tabellarisch so darzustellen, dass sie eine Übersicht der Ergebnisse bezüglich der sechs Kategorien (vgl. Abschnitt 5.3) bieten und Auskünfte über Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Gruppen geben.

Die Ergebnisse sind nach den beiden alters- und geschlechtsparallelisierten Gruppenpaaren getrennt dargestellt (vgl. Abschnitt 5.7.5.1):

1. Paar: Gehörlose (GL) \Leftrightarrow Kontrollgruppe 1 (K1)
2. Paar: Gebärdensprachdolmetscher (D) \Leftrightarrow Kontrollgruppe 2 (K2)

Die Gruppen D, K1 und K2 sind hörend. Die Gruppen GL und D beherrschen die Gebärdensprache. Zunächst werden die Aktivierungen innerhalb einer Gruppe für alle Kategorien gegen die Baseline sowie verschiedene Kontraste innerhalb dieser Gruppe zwischen zwei Kategorien dargestellt. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse aufgezeigt, die aufgrund der Kontrastierung zwischen zwei Gruppen erhoben wurden. Die Vergleiche zwischen zwei Gruppen finden nur innerhalb eines festgelegten Gruppenpaares statt. Bei allen Kontrasten, die eine Baseline benötigten, wurde das „Kreuz“ als implizite Baseline benutzt. Es sei darauf hingewiesen, dass die angestellten Kontraste zur Veranschaulichung der Ergebnisse zwischen den Hirnarealen und den einzelnen Gruppen in Anzahl und Ausprägung differieren. Alle theoretisch möglichen Vergleiche zwischen zwei Kategorien aufzulisten wäre aufgrund der daraus resultierenden Unübersichtlichkeit nicht adäquat. Aus diesem Grund wurden für jedes Areal die Vergleiche der sechs Kategorien gegen die Baseline sowie für das Areal besonders interessante Vergleiche zwischen zwei Bedingungen dargestellt. Diese orientierten sich an den in Kapitel 4 aufgestellten Hypothesen.

6.1 Ergebnisse in Bezug auf das Wernicke-Areal

6.1.1 Ergebnisse bezüglich der Hypothese 1

In der Tabelle 6.1 (detaillierte Informationen zu den dargestellten Tabellen siehe Kapitel 10) sind die Untersuchungsergebnisse für die *Gehörlosen* und in Tabelle 6.2 die der hörenden *Kontrollgruppe 1* dargestellt. Es schließt sich die Tabelle 6.3 an, welche die Aktivierungen der Kontrastierung der Gehörlosen gegen die Kontrollgruppe 1 zeigt ($GL > K1$). Für die ersten beiden Tabellen zeigen sich Aktivierungen im Wernicke-Areal auf die dargebotenen Stimuli, denen von der jeweiligen Gruppe semantische Bedeutungen zugeordnet werden konnten. Ausnahmen bilden die Kategorie *Gesten* bei den Gehörlosen und die Kategorie *Objekt* bei der Kontrollgruppe 1. Die Kontrastierungen zwischen zwei Kategorien gegeneinander zeigen in Tabelle 6.1, mit Ausnahme des Vergleiches *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil*, keine statistisch bedeutsamen Ergebnisse. Dieser Kontrast zeigt bei der Kontrollgruppe 1 dagegen keine Aktivierungen. Die anderen Kontraste zwischen zwei Bedingungen weisen signifikante Aktivierungen bei dieser Gruppe auf (vgl. Tabelle 6.2). Bei der Kontrastierung zwischen den beiden Gruppen ($GL > K1$) sind in allen Gebärdenbilder-Kategorien signifikant höhere Aktivierungen auf Seiten der Gehörlosen zu verzeichnen (vgl. Tabelle 6.3).

Für die *Gebärdensprachdolmetscher* stellen sich signifikante Aktivierungen in den sechs aktivierten Kategorien gegen Baseline dar (vgl. Tabelle 6.4). Bei den Kontrastierungen zwischen zwei Kategorien wurden die Aktivierungen der Kontraste *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden mit Pfeil* versus *Gebärden ohne Pfeil* signifikant. Bei der *Kontrollgruppe 2* zeigen sich nur Aktivierungen in den Kategorien *Gesten*, *Objekte* und *Gebärden ohne Pfeil*. Auffällig sind die fehlenden Aktivierungen im Wernicke-Areal auf die Darbietung der Kategorie *Wörter* (vgl. Tabelle 6.5). Die Kontrastierung der Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 2 erbrachte in beide Richtungen ($D > K2$ und $K2 > D$) keine signifikanten Ergebnisse (vgl. Tabelle 6.6).

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang D auf der beigefügten CD.

1. Gruppenpaar: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Tabelle 6.1: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gehörlosen*

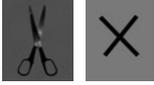
Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	7,28	0.000047	14	61	-31	10
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	6,36	0.00013	14	-54	-52	9
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	6,22	0.00016	8	61	-29	13
	L	6,08	0.00019	23	-51	-35	4
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	7,91	0.000024	15	45	-19	-1
	L	7,42	0.00004	82	-51	-34	2
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	5,93	0.00022	12	61	-31	10
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
 	R	4,58	0.0013	3	57	-28	4
	L	4,98	0.00076	9	-60	-7	5
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Wörter							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.2: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 1*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
	R	5,50	0.00026	9	42	-22	-7
	L	7,03	0.000036	33	-63	-37	17
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	5,38	0.00031	5	-54	-49	10
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	4,91	0.00062	5	-54	-43	4
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	7,52	0.00002	26	-57	-52	10
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
	R	8,56	0.000006	43	60	-24	10
	L	6,69	0.000055	31	-57	-49	10
Wörter versus Gebärden m. Pfeil							
	R			n. s.			
	L	5,60	0.00023	6	-54	9	-7

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.3: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Gehörlose* und *Kontrollgruppe 1* (GL > K1)

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
GL > K1 Gesten versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L			n. s.			
GL > K1 Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	5,32	0.000039	16	-69	-21	8
GL > K1 Objekt versus Baseline (Kreuz)	R	4,85	0.00011	25	58	-8	5
 	L	3,88	0.001	4	-65	-6	2
GL > K1 Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R	5,11	0.000063	37	61	-18	11
 	L	6,41	0.000004	27	-62	-21	12
GL > K1 Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)	R	6,23	0.000005	71	49	-9	-1
 	L	5,86	0.000012	59	-65	-18	11
GL > K1 Wörter versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L			n. s.			
GL > K1 Gebärden m. Pfeil versus Gesten	R			n. s.			
 	L	4,06	0.00067	8	-66	-49	9

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

2. Gruppenpaar: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Tabelle 6.4: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gebärdensprachdolmetscher*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	12,14	0.000006	28	-54	-45	2
Objekt versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	5,08	0.0014	3	-57	-47	2
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	11,38	0.000009	18	-54	-45	2
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	8,29	0.000073	16	-60	-52	9
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	9,70	0.000026	20	-54	-45	2
Wörter versus Baseline (Kreuz)	R	6,53	0.00033	3	51	11	-5
 	L	13,65	0.000003	36	-54	-45	2
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil	R			n. s.			
 	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil	R	8,38	0.000068	16	53	-46	9
 	L	7,32	0.00016	20	-54	-40	4
Gebärden m. Pfeil versus Gebärden o. Pfeil	R			n. s.			
 	L	5,35	0.0011	6	-66	-46	7
Gebärden m. Pfeil versus Wörter	R			n. s.			
 	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.5: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 2*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,97	0.00077	8	48	-35	4
	L	6,72	0.000087	23	-60	-52	9
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	5,31	0.00049	4	-54	-40	2
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,77	0.001	5	57	-46	2
	L	5,96	0.00021	5	-66	-46	13
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Wörter versus Gebärden m. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.6: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* (D > K2)

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
D > K2							
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Objekte versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L			n. s.			
D > K2							
Gebärden m. Pfeil versus Gesten							
	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Fasst man die Ergebnisse aller vier Gruppen bezüglich des Wernicke-Areals zusammen, kann die aufgestellte Hypothese 1, dass alle Gruppen Aktivierungen im Wernicke-Areal für die Bedingungen zeigen, die sie semantisch dekodieren konnten, tendenziell bestätigt werden (vgl. Abschnitt 4.1). In der überwiegenden Anzahl der untersuchten Vergleiche zeigte jede Gruppe Wernicke-Aktivierungen in den Bedingungen, die für sie semantisch dekodierbar waren. Ausnahme bildeten die jeweils in einer Gruppe fehlenden Aktivierungen bei den Kategorien *Objekt* (K1), *Wörter* (K2) und *Gesten* (GL). Die Ergebnisse bezüglich der Verteilung der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre werden im Folgenden vorgestellt.

6.1.2 Tests zu den Lateralisierungsmustern der Aktivierungen

Wie im Hypothesenteil bereits erläutert, sollen Aussagen zu den Lateralisierungsmustern gemacht werden. Da diese Fragen zur Verteilung der Aktivierungen nur das Wernicke-Areal, Broca-Areal und die Aktivierungen im ventralen Pfad betreffen und um unnötige Verwirrung zu vermeiden, wird die Methode zur Prüfung von Lateralitätsfragen hier dargestellt und nicht im allgemeinen Methodenteil. Im Folgenden ist zu prüfen, ob ein linksdominantes, rechtsdominantes oder bilaterales Aktivierungsmuster vorliegt. Es wird beispielsweise im Wernicke-Areal eine Verarbeitung der sprachbezogenen Stimuli in der sprachdominanten, linken Hemisphäre für die Kontrollgruppen erwartet. Dahingegen sollten die Gebärdensprachnutzer (Gehörlose und Gebärdensprachdolmetscher) ein eher bilaterales Aktivierungsmuster zeigen (vgl. z. B. Hypothese 2 in Kapitel 4.1). Diese Fragen zur Lateralisierung der Aktivierungen sollen mithilfe statistischer Tests geprüft und anhand von Abbildungen grafisch dargestellt werden.

6.1.2.1 Varianzanalysen mit Messwiederholung

Um Aussagen zur Verteilung der Aktivierungen auf der linken und rechten Hemisphäre machen zu können, wurden zunächst die β -Werte dieser Aktivierungen aus dem Programm Brain Voyager extrahiert. Dabei interessierten nur die Werte der sechs Bedingungen gegen die Baseline. Die noch unverarbeiteten β -Werte zeigen die Stärke der Übereinstimmung zwischen dem postulierten Modell und der tatsächlichen Blutfluss-Kurve jeder einzelnen Versuchsperson an (zu einem bestimmten Zeitpunkt = Bedingung). In der Nullhypothese H_0 wird angenommen, dass das β einen Wert von "Null" annimmt. Das tatsächliche β zeigt

dann die Abweichung von Null an. Ziel ist es, die Nullhypothese H_0 abzulehnen und die Alternativhypothese H_1 ($\beta \neq 0$) anzunehmen. Der entsprechend berechnete T-Wert ist die Prüfgröße für den β -Wert. Je höher der T-Wert bzw. β -Wert, desto höher ist das Signifikanzniveau der Aktivierung.

Wie bereits beschrieben, wurden zunächst für jede Versuchsperson die β -Werte des interessierenden Prädiktors extrahiert. Aus diesen β -Werten jeder Versuchsperson wurden die gemittelten β -Werte für diesen Prädiktor für die Gesamtgruppe berechnet und in die Analysen im Rahmen einer *Varianzanalyse mit Messwiederholung* einbezogen. Dieses Vorgehen wurde für jede ROI (Wernicke-Areal, Broca-Areal und ventraler Pfad) separat für die linke und rechte Hemisphäre wiederholt. Im Ergebnis dieses Verfahrens lag also ein gemittelter β -Wert für jede ROI der gesamten Gruppe je für die linke und rechte Hemisphäre vor.

Zur statistischen Absicherung der Aussagen zur Lateralisierung der Aktivierungen wurde für jede Gruppe und jedes Hirnareal (ROI) getrennt eine *Varianzanalyse mit Messwiederholung* auf Grundlage dieser β -Werte durchgeführt. Das bedeutet, dass für das gerade interessierende Hirnareal die β -Werte jeder Versuchsperson für die jeweils sechs Prädiktoren und beide Hemisphären vorlagen. Somit konnten die β -Werte der linken Hemisphäre mit denen der rechten innerhalb einer Gruppe und eines Areals verglichen werden. In der Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde zum einen der zweifach gestufte Innersubjektfaktor „*Lateralität* (= *lat*)“ mit den Abstufungen links (= *li*) und rechts (= *re*) untersucht. Zum anderen wurde zur Prüfung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse der Innersubjektfaktor „*Bedingung* (= *bedingung*)“ mit den sechs Abstufungen Gesten (= *GES*), Objekt (= *OBJ*), Gebärden mit Pfeil (= *PFE*), Gebärden ohne Pfeil (= *SIN*), Gebärden statisch (= *STA*) und Wörter (= *WÖR*) erhoben. Da aber nur die Lateralität der Aktivierungen interessierte, wurde dieser Innersubjektfaktor nicht interpretiert. Außerdem ergab sich die Interaktion „*lat*bedingung*“, die interpretiert wurde, um bezüglich des Haupteffektes „*Lateralität*“ generalisierende Aussagen machen zu können. Zur Absicherung eventueller Unterschiede bezüglich der *Interaktion* „*lat*bedingung*“ wurden *T-Tests bei gepaarten Stichproben* durchgeführt. Um ein „familiäres“ Niveau (= Gesamt- α -Niveau) von $p = 0.05$ für die sich anschließenden Paarvergleiche zu gewährleisten, wurde eine konservative Bonferroni-Korrektur des α -Fehlers durchgeführt, d. h. alle Prüfgrößen der kontrastierten Paarvergleiche wurden gegen ein korrigiertes α -Niveau (hier: $p = 0.0083$) geprüft.

6.1.2.2 Lateralitätsindex

Die Berechnung des Lateralitätsindex (= LI oder auch Lateralisierungsindex) basierte auf der Anzahl der signifikant aktivierten Voxel (= N_{rofVo}), die für jede Gruppe, Bedingung und jedes Areal erhoben wurden (siehe in den Tabellen in diesem Ergebnisteil). Es werden jene Voxel angezeigt, die die festgelegten Kriterien bezüglich der Signifikanz ($p < .05$) erfüllten. Die in den Tabellen angezeigten Voxel sind als über alle Versuchspersonen gemittelte Anzahl der Voxel für die entsprechende Bedingung in dem gewünschten Areal zu verstehen. Die gemittelte Anzahl der Voxel basiert auf einem Verfahren, welches die Zwischen-Subjekt-Variabilität mit einbezieht. Da in den Daten die Varianzen enthalten sind, können sie zu weiteren Berechnungen herangezogen werden. Aus den gemittelten Voxeln wurde der Lateralitätsindex (= LI) gebildet. Der Lateralitätsindex berechnet sich folgendermaßen:

$$LI = \frac{N_{rofVo}_{RECHTS} - N_{rofVo}_{LINKS}}{N_{rofVo}_{RECHTS} + N_{rofVo}_{LINKS}}$$

Formel 6.1

Formel zur Berechnung des Lateralitätsindex

Zeichenerklärung: LI = Lateralitätsindex
 N_{rofVo} = Number of Voxel (Voxelanzahl)

Der Lateralitätsindex ist der Quotient aus der Differenz zwischen den Aktivierungen der rechten und linken Hemisphäre und der Summe der aktivierten Voxel beider Hemisphären. Für den Fall, dass in beiden Hemisphären je die gleiche Anzahl von Voxeln aktiviert ist, erhält man bei der Berechnung des Lateralitätsindex die Zahl „0“, da in diesem Fall keine Lateralität zu Gunsten einer Hemisphäre besteht. Aus der Formel errechnete positive Werte (> 0) zeigen eine Rechtslateralisierung an, wogegen negative Werte (< 0) für eine Linkslateralisierung der zerebralen Aktivierung sprechen (vgl. Brechmann & Scheich, 2005; Ortigue, Thut, Landis & Michel, 2005). Die Ergebnisse werden anschließend in Grafiken veranschaulicht. Dabei dient die Nulllinie als Entscheidungskriterium für die Lateralisierung aller Werte. Die Werte können sich zwischen +1 (= Rechtslateralisierung) und -1 (Linkslateralisierung) bewegen.

An dieser Stelle soll auf ein Problem hingewiesen werden, das bei der Betrachtung der Ergebnisse bezüglich der Lateralität beachtet werden muss. Bei der Interpretation der Grafiken muss bemerkt werden, dass diese auf der gemittelten Menge der aktiven Voxel

basieren. Die statistischen Berechnungen beruhen dagegen auf den Individualdaten der einzelnen Versuchspersonen und die dort zu den Berechnungen herangezogenen β -Werte zeigen die Stärke der Signifikanz der einzelnen Voxel an. So ist es beispielsweise möglich, dass in einer Bedingung auf der rechten Hemisphäre eine geringe Anzahl von Voxeln vorliegt, diese aber sehr hohe T-Werte aufweisen (stark signifikant). In der linken Hemisphäre ist dagegen bei dieser Bedingung eine hohe Anzahl von Voxeln mit sehr niedrigen T-Werten zu finden (nur gering über dem festgelegten Signifikanzniveau $p < .05$). Für die statistische Berechnung bedeutet das, dass aufgrund der hohen Werte der wenigen Voxel in der rechten Hemisphäre ein negativer Trend entsteht oder der Unterschied zwischen linker und rechter Hemisphäre nicht signifikant wird (trotz hoher Voxelanzahl in der linken Hemisphäre). In der grafischen Darstellung wird sich dagegen eine klare linkshemisphärische Lateralität finden, da sich diese nur auf die Voxelanzahl bezieht, die in beschriebenem Beispiel auf der linken Hemisphäre größer ist als auf der rechten. Die Statistik stellt folglich eher die Qualität (statistische Sicherheit) der Aktivierungen dar, die Grafiken dagegen die Quantität der Aktivierungen, was zu abweichenden Trends zwischen statistischen Tests und grafischer Darstellung führen kann. Für die Diskussion werden die statistischen Tests und deren Ergebnisse auf einem Signifikanzniveau von $p < .05$ herangezogen, die Grafiken dienen der ergänzenden Veranschaulichung.

6.1.3 Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Wernicke-Areal – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 2

Zunächst soll kurz zusammengefasst werden, was die Tabellen bezüglich der Lateralisierung der Aktivierungen aussagen. Die statistische Prüfung schließt sich direkt an die Beschreibung der Ergebnisse an.

Für die Gruppe der auditiv Deprivierten zeigt sich bei den Vergleichen der sechs Kategorien gegen die implizite Baseline ein tendenziell bilaterales Aktivierungsmuster (vgl. Tabelle 6.1), wogegen die Kontrollgruppe 1 bei diesen Kontrasten eine eher linkshemisphärische Asymmetrie der Aktivierungen zeigt (vgl. Tabelle 6.2). Dieses tendenzielle linkshemisphärische Muster der Aktivierungen wurde auch bei den Gebärdensprachdolmetschern gefunden (vgl. Tabelle 6.3). Für die Kontrollgruppe 2 lassen sich zunächst keine Aussagen zur Lateralisierung der Aktivierungen treffen, da eine zu geringe Anzahl von signifikanten Aktivierungen zu finden ist (vgl. Tabelle 6.4). Im

Folgenden werden die Aktivierungen hinsichtlich der Frage nach Lateralität statistisch geprüft.

Für die Gruppe der Gehörlosen wurde der *Haupteffekt* „Lateralität“ nicht signifikant [$F(1,9) = 0.023, p = .88$]. Das bedeutet, dass sich die Anzahl der Voxel zwischen der linken und rechten Hemisphäre im Mittel über alle Bedingungen nicht unterscheidet. Die *Interaktion* „lat*bedingung“ wurde dagegen signifikant [$F(5,45) = 42.53, p < .05$]. Zur Klärung der Frage, wo genau die Unterschiede liegen, wurden *T-Tests bei gepaarten Stichproben* durchgeführt. Folgende Paarvergleiche wurden signifikant: [OBJ: $t(9) = 7.92, p < .0083$; PFE: $t(9) = -6.39, p < .0083$; WÖR: $t(9) = 6.12, p < .0083$; *Bonferroni*]. Dagegen wiesen die Kategorien [SIN: $t(9) = -1.04, p = .34$; *Bonferroni*] und [STA: $t(9) = -1.77, p = .11$; *Bonferroni*] keine signifikanten Ergebnisse auf (der Paarvergleich für die Kategorie *Gesten* konnte aufgrund fehlender Daten nicht erzeugt werden). Trotz einiger signifikanter Paarvergleiche ist der Haupteffekt „Lateralität“ nicht interpretierbar.

Der *Haupteffekt* „Lateralität“ wurde für die Kontrollgruppe 1 statistisch bedeutsam [$F(1,10) = 56.29, p < .05$]. Im Mittel über die sechs Bedingungen weist also die Kontrollgruppe 1 signifikant höhere Aktivierungen in der linken gegenüber der rechten Hemisphäre auf. Die *Interaktion* „lat*bedingung“ wies ein ebenfalls signifikantes Ergebnis auf [$F(5,50) = 16.33, p < .05$]. Bei der Absicherung des Unterschiedes für die *Interaktion* mithilfe von *T-Tests bei gepaarten Stichproben* zeigten nur die Bedingungen *Gebärden statisch* [$t(10) = -4.52, p < .0083$; *Bonferroni*] und *Wörter* [$t(10) = -7.89, p < .0083$; *Bonferroni*] signifikante Unterschiede in den β -Werten zwischen der linken und rechten Hemisphäre. Die anderen Paarvergleiche waren nicht signifikant unterschiedlich [GES: $t(7) = -.67, p = .52$; die anderen Vergleiche konnten aufgrund fehlender Werte nicht erzeugt werden; *Bonferroni*]. Die Trends der Lateralitätsmuster weisen hybride (= zum postulierten Trend entgegengesetzte) Interaktionen auf (vgl. Nachtigall & Wirtz, 2002). Aus diesem Grund ist der *Haupteffekt* „Lateralität“ nur eingeschränkt interpretierbar. Das bedeutet, dass der Haupteffekt zwar im Mittel über alle sechs Bedingungen Gültigkeit hat, nicht aber generell Bestand hat.

Die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher weist sowohl für den *Haupteffekt* „Lateralität“ [$F(1,7) = 470.84, p < .05$] als auch für die *Interaktion* „lat*bedingung“ [$F(5,35) = 9.52, p < .05$] statistisch bedeutsame Ergebnisse auf. Der Haupteffekt wird für alle sechs Kategorien signifikant: [GES: $t(7) = -12.17, p < .0083$; OBJ: $t(7) = -5.02, p < .0083$; PFE: $t(7) = -11.24, p < .0083$; SIN: $t(7) = -8.33, p < .0083$; STA: $t(7) = -10.90, p < .0083$; WÖR: $t(7) = -3.84, p < .0083$; *Bonferroni*]. Alle sechs Bedingungen zeigen ordinale

(= in die gleiche Richtung wie die hier postulierten Trends) Interaktionen. Somit ist der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ uneingeschränkt interpretierbar und die Aktivierungen der linken Hemisphäre sind in der Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher signifikant höher gegenüber der rechten Hemisphäre.

Für die Kontrollgruppe 2 wurde der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ statistisch nicht bedeutsam [$F(1,9) = 2.90, p = .12$]. Wie für die Gruppe der Gehörlosen bedeutet das auch hier, dass sich die Höhe der Aktivierungen zwischen den beiden Hemisphären nicht unterscheidet. Die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ wies dagegen ein signifikantes Ergebnis auf [$F(5,45) = 3.96, p < .05$]. Signifikante Ergebnisse ergaben sich für den Paarvergleich [OBJ: $t(9) = -5.34, p < .0083$; *Bonferroni*]. Der *T-Test bei gepaarten Stichproben* wurde für die Bedingungen [GES: $t(9) = -.61, p = .56$; SIN: $t(9) = .16, p = .88$; *Bonferroni*] nicht signifikant (die Paarvergleiche *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden statisch* und *Wörter* konnten aufgrund fehlender Daten nicht erzeugt werden). Die Interpretation des *Haupteffektes* „*Lateralität*“ ist hier unzulässig.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang E auf der beigefügten CD. Die Abbildung 6.1 zeigt das Verhältnis der Anzahl aktivierter Voxel in der rechten und linken Hemisphäre anhand des Lateralitätsindex auf Basis gemittelter Voxelanzahlen.

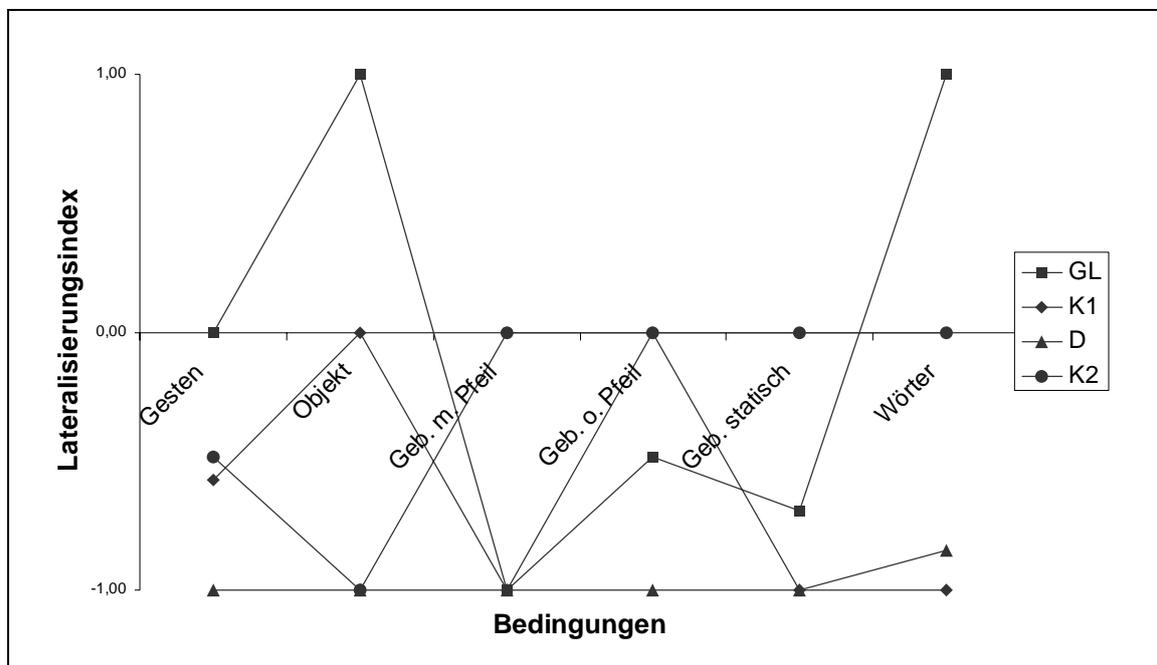


Abbildung 6.1:

Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *Wernicke*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen.

Zusammenfassend kann die Hypothese 2 bezüglich des erwarteten, bilateralen Aktivierungsmusters für die Gebärdensprachdolmetscher nicht bestätigt werden. Der Haupteffekt „Lateralität“ wurde für die Gehörlosen nicht signifikant, was durch fehlende, signifikante Unterschiede zwischen der linken und rechten Hemisphäre als bilaterales Aktivierungsmuster gedeutet werden kann und somit die aufgestellte Hypothese bestätigt. Die Gebärdensprachdolmetscher zeigten entgegen den Erwartungen ein linkslateralisiertes Aktivierungsmuster. Für die Kontrollgruppe 1 ließen sich die erwarteten linkslateralisierten Aktivierungen nachweisen. Dieser Haupteffekt wurde für die Kontrollgruppe 2 statistisch nicht bedeutsam und ist somit für diese Gruppe nicht hypothesenkonform.

6.2 Ergebnisse in Bezug auf das Broca-Areal

6.2.1 Ergebnisse bezüglich der Hypothese 3

Auf die Darbietung der sechs Stimuli zeigen die Gehörlosen in keiner der sechs dargebotenen Kategorien Aktivierungen im Broca-Areal (vgl. Tabelle 6.7).

In Tabelle 6.8 sieht man für die Kontrollgruppe 1 dagegen Aktivierungen für alle dargebotenen Kategorien (gegen die Baseline). Bei den Vergleichen zwischen zwei Kategorien weist der Kontrast *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* keine Aktivierungen auf.

Aufgrund der fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal der Gehörlosen zeigen sich deutlich höhere Aktivierungen bei der Kontrollgruppe 1 im Kontrast $K1 > GL$, bis auf die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil*. (vgl. Tabelle 6.9).

Die Gebärdensprachdolmetscher zeigen auf alle sechs Kategorien Aktivierungen in diesem klassischen Sprachareal (vgl. Vergleich 6.10). In Bezug auf die angestellten Kontrastierungen zwischen zwei Kategorien war der Kontrast *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* als Einziger statistisch bedeutsam aktiviert.

Die Kontrollgruppe 2 zeigt auf fünf der sechs dargebotenen Kategorien Aktivierungen im Broca-Areal (vgl. Tabelle 6.11). Eine Ausnahme bildet die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil*. Bei dem Vergleich zwischen den beiden Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* zeigt keine der beteiligten Gruppen signifikant höhere Aktivierungen als die andere Gruppe (vgl. Tabelle 6.12).

Aussagen zur Lateralisierungen der Aktivierungen und deren statistischer Prüfung werden in Kapitel 6.2.2 vorgestellt.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang F auf der beigefügten CD.

1. Gruppenpaar: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Tabelle 6.7: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gehörlosen*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Wörter							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.8: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 1*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	6,01	0.00013	6	48	24	17
	L	10,01	0.000002	72	-51	14	13
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	7,65	0.000017	36	-54	20	10
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	6,92	0.000041	14	51	24	10
	L	9,20	0.000003	44	-48	20	7
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	5,17	0.00042	4	48	24	19
	L	5,59	0.00023	10	-48	25	17
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	5,17	0.00042	35	-54	26	7
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	9,58	0.000002	79	-45	15	10
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L	5,98	0.00014	62	-56	22	-1
Wörter versus Gebärden m. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L	5,16	0.00043	22	-60	14	10

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.9: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Kontrollgruppe 1* und *Gehörlose* (K1 > GL)

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
K1 > GL							
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	5,31	0.00004	18	-49	15	16
K1 > GL							
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	5,10	0.000063	14	-53	24	11
K1 > GL							
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	5,04	0.000072	12	-49	15	16
K1 > GL							
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K1 > GL							
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	4,08	0.00063	5	-56	27	13
K1 > GL							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	4,23	0.00046	22	-47	19	12

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

2. Gruppenpaar: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Tabelle 6.10: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gebärdensprachdolmetscher*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	8,47	0.000063	32	-54	23	17
Objekt versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	12,96	0.000004	24	-54	26	7
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	9,13	0.00004	32	-51	23	17
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L	5,29	0.0011	6	-60	23	13
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)	R			n. s.			
 	L			n. s.			
Wörter versus Baseline (Kreuz)	R	6,02	0.00053	7	51	9	17
 	L	14,85	0.000002	63	-57	20	16
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil	R			n. s.			
 	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil	R			n. s.			
 	L	6,44	0.00035	6	-51	24	1
Gebärden m. Pfeil versus Gebärden o. Pfeil	R			n. s.			
 	L			n. s.			
Gebärden m. Pfeil versus Wörter	R			n. s.			
 	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.11: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 2*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	8,98	0.000009	22	48	24	17
	L	7,70	0.00003	53	-51	24	7
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	6,37	0.00013	22	-60	17	16
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	5,51	0.00038	4	51	14	16
	L	9,96	0.000004	17	-54	23	-1
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	8,40	0.000015	5	48	24	19
	L	6,54	0.00011	23	-33	23	4
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	7,77	0.000028	6	52	11	19
	L	7,52	0.000036	44	-57	23	19
Gebärden statisch versus Gebärden o. Pfeil							
 	R	7,61	0.000033	8	51	17	13
	L			n. s.			
Gesten versus Gebärden o. Pfeil							
 	R	7,77	0.000028	11	48	22	5
	L	7,87	0.000025	4	-51	23	19
Wörter versus Gebärden m. Pfeil							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.12: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Kontrollgruppe 2* und *Gebärdensprachdolmetscher* (K2 > D)

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	Z
K2 > D							
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich für die hörenden Gruppen die aufgestellte Hypothese 3 im Broca-Areal bestätigen lässt (vgl. Abschnitt 4.2). Die Gruppe der Gehörlosen zeigt entgegen den Erwartungen keine Aktivierungen im Broca-Areal. Für die Gebärdensprachdolmetscher konnte die Hypothese mit Ausnahme der Kategorie *Gebärden statisch* bestätigt werden. Die Hypothese bezüglich der Lateralisierungsmuster der Aktivierungen wird anhand von Varianzanalysen mit Messwiederholung geprüft, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

6.2.2 Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Broca-Areal – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 4

Zunächst sollen zur besseren Übersicht kurz Aussagen zu den Aktivierungsmustern in allen Gruppen gemacht werden. Für die Gehörlosen kann aufgrund fehlender Aktivierungen kein Lateralitätsmuster festgestellt werden. Die Aktivierungen der Kontrollgruppe 1 weisen eine tendenzielle Dominanz der linken Hemisphäre auf (vgl. Tabelle 6.8). Diese linkshemisphärische Dominanz der Aktivierungen war für beide Kontrollgruppen in Hypothese 4 postuliert worden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Gebärdensprachdolmetscher weisen im Broca-Areal eine vergleichbare Dominanz der Aktivierungen in der sprachdominanten, linken Hemisphäre wie die Kontrollgruppe 1 auf (vgl. Tabelle 6.10). Es lässt sich des Weiteren bei der Kontrollgruppe 2 ein bilaterales Muster der Aktivierungen erkennen, was bedeutet, dass die Aktivierungen der rechten Hemisphäre mit denen der linken vergleichbar sind (vgl. Tabelle 6.11). Im Folgenden werden die deskriptiven Aussagen statistisch geprüft.

Die Gruppe der Gehörlosen wies in keiner der sechs Bedingungen gegen Baseline Aktivierungen in der linken oder rechten Hemisphäre im Broca-Areal auf. Folglich wurde keine Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt, da aufgrund fehlender Werte kein Test erzeugt werden konnte. Somit ließen sich weder der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ noch die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ prüfen. In der grafischen Darstellung des Lateralitätsindex wird diese Gruppe als Nulllinie dargestellt (vgl. Abbildung 6.2).

Die Kontrollgruppe 1 zeigte bezüglich des *Haupteffektes* „*Lateralität*“ ein statistisch bedeutsames Ergebnis [$F(1,10) = 83.29, p < .05$]. Ebenso signifikant wurde die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ [$F(5,50) = 15.17, p < .05$]. Bei der Untersuchung der multiplen Paarvergleiche mithilfe eines *T-Tests bei gepaarten Stichproben* zeigte sich, dass der Haupteffekt „*Lateralität*“ nur für folgende Bedingungen signifikant wurde: [GES: $t(10) = -10.47, p < .0083$; OBJ: $t(10) = -7.92, p < .0083$; STA: $t(10) = -4.90, p < .0083$; WÖR: $t(10) = -9.37, p < .0083$; *Bonferroni*]. Für die Bedingungen *Gebärden mit Pfeil* und *Gebärden ohne Pfeil* zeigten sich lediglich die gleiche Tendenz im Trend, aber kein signifikantes Ergebnis [PFE: $t(10) = -.58, p = .57$; SIN: $t(10) = -.78, p = .46$; *Bonferroni*]. Obwohl der Haupteffekt nur bei vier der sechs Paarvergleiche signifikant wurde, zeigen alle sechs Bedingungen ordinale Interaktionen. Aus diesem Grund ist der Haupteffekt interpretierbar. Das bedeutet, dass für die Kontrollgruppe 1 gesagt werden kann, dass die Aktivierungen in der linken Hemisphäre im Mittel signifikant höher sind als in der rechten Hirnhälfte.

Auch bei der Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher zeigte die Varianzanalyse mit Messwiederholung einen signifikanten *Haupteffekt* „Lateralität“ [$F(1,7) = 229.83, p < .05$] und eine signifikante *Interaktion* „lat*bedingung“ [$F(5,35) = 17.21, p < .05$]. Fünf der sechs Paarvergleiche wurden signifikant [GES: $t(7) = -8.63, p < .0083$; OBJ: $t(7) = -12.23, p < .0083$; PFE: $t(7) = -9.35, p < .0083$; SIN: $t(7) = -5.29, p < .0083$; WÖR: $t(7) = -4.80, p < .0083$; *Bonferroni*]. Ein Paarvergleich weist eine hybride Interaktion auf, weswegen der Haupteffekt „Lateralität“ nur eingeschränkt interpretierbar ist. Man kann daher nicht behaupten, dass bei dieser Gruppe generell die linke Hemisphäre signifikant stärker aktiviert ist als die rechte Hirnhälfte, sondern lediglich, dass ein linkslateralisiertes Aktivierungsmuster im Mittel über die untersuchten sechs Bedingungen vorliegt.

Bei der Kontrollgruppe 2 wies der *Haupteffekt* „Lateralität“ kein signifikantes Ergebnis auf [$F(1,9) = 2.07, p = .18$]. Für die Kontrollgruppe lag folglich kein signifikanter Unterschied in den Voxelanzahlen zwischen der linken und rechten Hemisphäre vor. Allerdings zeigte sich bei der Betrachtung der *Interaktion* „lat*bedingung“ ein statistisch bedeutsames Ergebnis [$F(5,45) = 4.41, p < .05$]. Nach Überprüfung aller Bedingungen mittels *T-Tests bei gepaarten Stichproben* wurde der Paarvergleich Objekte signifikant [OBJ: $t(9) = -6.32, p < .0083$; *Bonferroni*]. Dieses Ergebnis trifft nicht für die anderen Paarvergleiche zu [GES: $t(9) = -.16, p = .88$; PFE: $t(9) = -1.28, p = .23$; STA: $t(9) = 1.30, p = .22$; WÖR: $t(9) = -.69, p = .51$; *Bonferroni*; SIN wurde nicht erzeugt]. Die Interpretation des *Haupteffektes* „Lateralität“ ist aufgrund der fehlenden statistischen Bedeutsamkeit unzulässig.

Die Abbildung 6.2 macht die Lateralisierungsmuster anhand gemittelter Voxelanzahlen über alle Personen einer Gruppe deutlich.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang G auf der beigelegten CD.

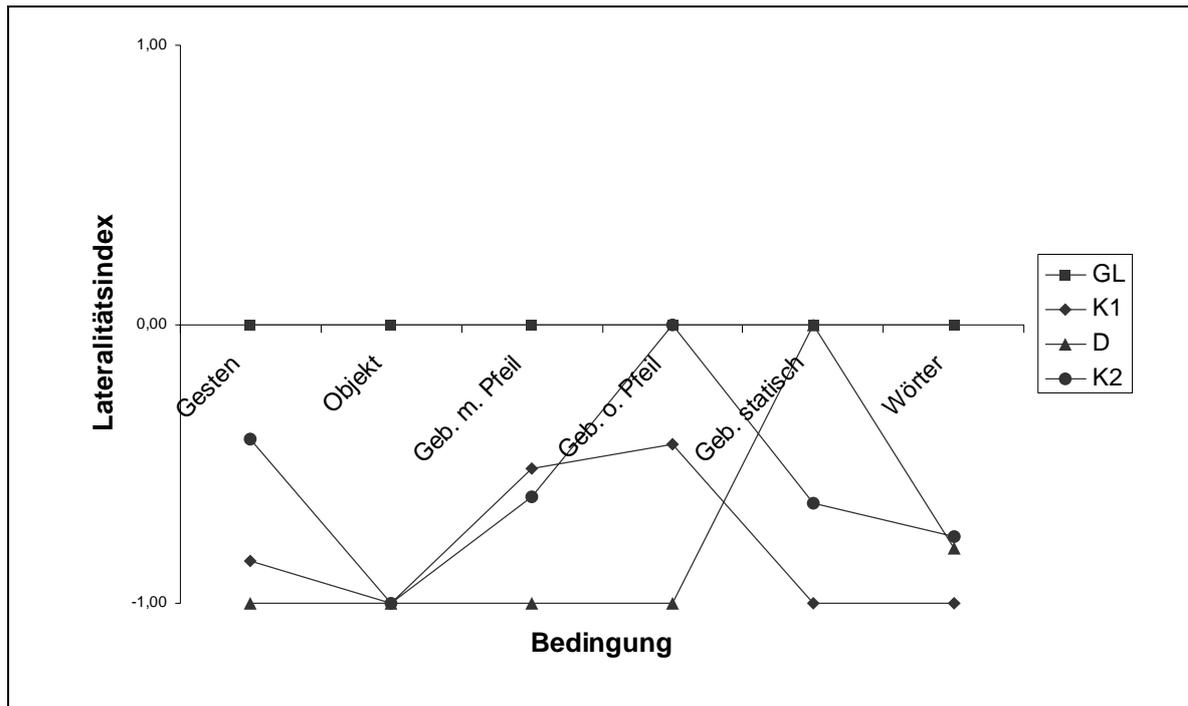


Abbildung 6.2:

Lateraliätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *Broca*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen.

Die erwarteten bilateralen Aktivierungsmuster im Broca-Areal für die Gruppen, die die Gebärdensprache nutzen, konnten weder für die Gehörlosen (keine Aktivierungen) noch für die Gebärdensprachdolmetscher (linkslateralisiert) bestätigt werden. Für die Kontrollgruppe 1 konnte dagegen das postulierte, linkslateralisierte Aktivierungsmuster bestätigt werden. Die Kontrollgruppe 2 zeigte keine signifikanten Ergebnisse bei der Prüfung des Haupteffektes „Lateralität“. Folglich kann für diese Gruppe die aufgestellte Hypothese nicht bestätigt werden.

In der Abbildung 6.2 ist dennoch deutlich zu erkennen, dass für beide Kontrollgruppen die Werte des Lateraliätsindex über der Nulllinie liegen und sich somit die postulierte linkslateralisierte Asymmetrie der Aktivierungen tendenziell aufgrund der gemittelten Voxelanzen-Werte bestätigen lässt.

6.3 Ergebnisse in Bezug auf den ventralen Pfad

6.3.1 Ergebnisse bezüglich der Hypothese 5

Die Betrachtung der Ergebnisse bezüglich des ventralen Pfades zeigt, dass sich bei Darbietung der sechs Stimuluskategorien bei allen vier Gruppen sehr hohe Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre zeigen (vgl. Tabelle 6.13, 6.14, 6.16, 6.17). Somit lässt sich die Hypothese 5 (vgl. Abschnitt 4.3) bestätigen, in der hohe Aktivierungen im ventralen Pfad für alle Gruppen erwartet wurden.

Bei den Gehörlosen zeigen sich erwartungsgemäß hohe bilaterale Aktivierungen auf die Darbietung bewegungs- und sprachrelevanter Stimuli (vgl. Tabelle 6.13). Diese Feststellung trifft ebenfalls auf die Aktivierungen der *Kontrollgruppe 1* zu (vgl. Tabelle 6.14). Bei der Kontrastierung beider Gruppen zeigen sich erhöhte Aktivierungen der Kontrollgruppe 1 gegenüber den Gehörlosen ($K1 > GL$). Dabei fällt auf, dass sich die höheren Aktivierungen nicht nur auf die linke Hemisphäre beschränken, sondern sich auch in der rechten Hemisphäre hohe Aktivierungen bei der hörenden Kontrollgruppe 1 zeigen (vgl. Tabelle 6.15).

Die *Gebärdensprachdolmetscher* und die *Kontrollgruppe 2* weisen ebenfalls hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären im ventralen Pfad auf (vgl. Tabelle 6.16 und Tabelle 6.17). Der Vergleich zwischen den Gebärdensprachdolmetschern und der Kontrollgruppe 2 zeigt bis auf geringe Aktivierungen in der Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* keine Unterschiede (vgl. Tabelle 6.18). Diese fehlenden Unterschiede gelten für beide Richtungen ($K2 > D$ und $D > K2$). Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang H auf der beigefügten CD.

Die Vermutungen zu den Lateralisierungen der Aktivierungen sollen in Kapitel 6.3.2 statistisch geprüft werden.

1. Gruppenpaar: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Tabelle 6.13: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gehörlosen*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	9,09	0.000008	78	40	-57	-17
	L	11,53	0.000001	123	-57	-70	4
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,83	0.000002	69	39	-55	-17
	L	11,31	0.000001	147	-54	-67	-1
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,11	0.000001	119	39	-63	-14
	L	10,53	0.000002	195	-51	-73	-1
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,59	0.000001	87	39	-61	-15
	L	11,13	0.000001	129	-53	-64	-8
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,44	0.000001	87	39	-63	-15
	L	11,38	0.000001	147	-51	-67	1
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,83	0.000002	50	38	-62	-15
	L	11,59	0.000001	101	-48	-57	-17

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.14: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 1*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,42	0.000001	166	30	-48	-15
	L	10,10	0.000001	189	-54	-67	-1
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,29	0.000001	167	29	-47	-14
	L	10,41	0.000001	191	-63	-52	-14
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,37	0.000001	191	26	-43	-15
	L	10,38	0.000001	191	-54	-61	-2
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,07	0.000001	146	30	-42	-19
	L	10,31	0.000001	161	-48	-69	-1
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,12	0.000001	153	29	-47	-15
	L	10,40	0.000001	154	-51	-58	-3
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	10,17	0.000001	119	27	-45	-15
	L	10,44	0.000001	191	-48	-62	-19

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.15: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Kontrollgruppe 1* und *Gehörlose* (K1 > GL)

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
K1 > GL							
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	5,04	0.000073	26	40	-66	8
	L	5,17	0.000054	14	-50	-60	1
K1 > GL							
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	5,25	0.000046	20	46	-65	-13
	L	4,04	0.0007	7	-47	-54	-15
K1 > GL							
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,89	0.0001	18	40	-57	-16
	L	4,28	0.0004	11	-45	-63	-1
K1 > GL							
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,74	0.00014	12	37	-61	-15
	L			n. s.			
K1 > GL							
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,65	0.00018	6	37	-61	-15
	L			n. s.			
K1 > GL							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	3,96	0.00085	12	43	-65	-13
	L	3,86	0.0011	16	-58	-54	-16

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

2. Gruppenpaar: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Tabelle 6.16: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gebärdensprachdolmetscher*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	14,92	0.000001	132	36	-34	-20
	L	15,52	0.000001	180	-54	-65	-15
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	14,05	0.000002	131	30	-46	-14
	L	14,67	0.000002	146	-45	-58	-19
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	14,87	0.000001	161	33	-39	-17
	L	15,43	0.000001	194	-60	-64	1
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	15,58	0.000001	150	33	-39	-17
	L	15,12	0.000001	130	-48	-61	-19
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	15,08	0.000001	122	33	-39	-19
	L	15,36	0.000001	148	-48	-65	-15
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	12,92	0.000004	75	38	-62	-15
	L	14,38	0.000002	133	-42	-57	-19

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.17: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 2*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,16	0.000001	126	41	-64	2
	L	11,23	0.000001	115	-48	-69	1
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,21	0.000001	103	35	-52	-15
	L	11,50	0.000001	161	-48	-64	-14
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,63	0.000001	135	36	-49	-15
	L	11,41	0.000001	185	-51	-69	-1
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,21	0.000001	109	35	-52	-15
	L	11,33	0.000001	142	-51	-69	-1
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R	11,42	0.000001	117	24	-38	-15
	L	11,56	0.000001	155	-54	-68	-1
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R	7,76	0.000028	42	43	-67	-1
	L	8,40	0.000015	64	-51	-73	-1

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.18: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastierung zwischen den Gruppen *Kontrollgruppe 2* und *Gebärdensprachdolmetscher (K2 > D)*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
K2 > D							
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R	4,07	0.00088	6	43	-57	-19
	L			n. s.			
K2 > D							
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
K2 > D							
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Alle vier Gruppen zeigen die postulierten hohen bilateralen Aktivierungen im ventralen Pfad (vgl. Abschnitt 4.3; Hypothesen 5). Der Gruppenvergleich zwischen den Gehörlosen und der Kontrollgruppe 1 zeigt deutlich höhere Aktivierungen im ventralen Pfad auf Seiten der Kontrollgruppe. Dieser Gruppenkontrast zwischen den Gebärdensprachdolmetschern und der Kontrollgruppe 2 wies dagegen keine bedeutsamen Unterschiede auf. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse bezüglich der Lateralisierungsmuster untersucht und statistisch geprüft.

6.3.2 Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im ventralen Pfad – Ergebnisse bezüglich der Hypothese 6

Trotz hoher Aktivierungen in der rechten Hemisphäre zeigen die *Gehörlosen* eine tendenzielle Dominanz der linken Hemisphäre bei der Verarbeitung der Stimuli, was in höheren Aktivierungen in dieser Hemisphäre resultiert (vgl. Tabelle 6.13). Die *Kontrollgruppe 1* weist neben den Aktivierungen in der linken Hemisphäre eine hohe Mitbeteiligung der rechten Hemisphäre bei allen Kategorien auf. Es sei darauf hingewiesen, dass sich bei den Kategorien *Gesten*, *Objekte* und *Wörter* tendenziell eine linksdominante Asymmetrie der Aktivierungen findet (vgl. Tabelle 6.14). In den Kategorien *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch* sind die linke und rechte Hemisphäre dagegen tendenziell gleichermaßen aktiviert und die linke Hemisphäre nicht dominant. Die *Gebärdensprachdolmetscher* und die *Kontrollgruppe 2* weisen (vgl. Tabelle 6.16 und Tabelle 6.17) in der Gesamtsumme der durchgeführten Vergleiche tendenziell höhere signifikante Aktivierungen in der linken Hemisphäre gegenüber der rechten Hemisphäre auf (trotz hoher Aktivierungen in der rechten Hemisphäre). Eine Ausnahme bildet die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* bei den Gebärdensprachdolmetschern. Hier ist in der linken Hemisphäre eine geringere Anzahl aktivierter Voxel als in der rechten Hemisphäre zu verzeichnen. Bei der Kontrollgruppe 2 fällt außerdem auf, dass die Kategorie *Wörter* deutlich geringere Aktivierungen hervorruft als die anderen Kategorien (vgl. Tabelle 6.17). Die Vermutungen zu den Lateralisierungen der Aktivierungen sollen im Folgenden statistisch geprüft werden.

Die *Gehörlosen* zeigten eine empirische Tendenz für den *Haupteffekt* „*Lateralität*“ [$F(1,9) = 4.29, p = .068$]. Tendenziell ist folglich erkennbar, dass die linke Hemisphäre signifikant höhere Aktivierungen aufweist, als die rechte Hemisphäre. Die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ wies kein signifikantes Ergebnis auf [$F(5,45) = 1.31, p = .28$].

Bei der *Kontrollgruppe 1* wurde der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ statistisch nicht bedeutsam [$F(1,10) = .24, p = .64$]. Die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ wurde dagegen signifikant [$F(5,50) = 14.04, p < .05$]. Die statistische Prüfung der Bedingungen mithilfe der *T-Tests bei gepaarten Stichproben* zeigte nur für die Bedingungen *Objekte* und *Gebärden statisch* statistisch bedeutsame Ergebnisse [OBJ: $t(10) = -5.04, p < .0083$; STA: $t(10) = 3.81, p < .0083$; *Bonferroni*]. Die anderen Paarvergleiche wiesen keine signifikanten Ergebnisse auf [GES: $t(10) = .18, p = .86$; PFE: $t(10) = .77, p = .46$; SIN: $t(10) = .83, p = .43$; WÖR: $t(10)$

= -2.78, $p = .02$; *Bonferroni*]. Trotz einiger signifikanter Paarvergleiche ist der *Haupteffekt* „Lateralität“ nicht interpretierbar.

Der *Haupteffekt* „Lateralität“ wurde für die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher [$F(1,7) = .20$, $p = .67$] sowie für die Kontrollgruppe 2 [$F(1,9) = .04$, $p = .86$] nicht signifikant. Die Gebärdensprachdolmetscher zeigten allerdings eine signifikante *Interaktion* „lat*bedingung“ [$F(5,35) = 17.74$, $p < .05$], ebenso die Kontrollgruppe 2 [$F(5,45) = 4.48$, $p < .05$]. Bei der ersten Gruppe wies folgender Paarvergleich ein signifikantes Ergebnis auf: [OBJ: $t(7) = -4.43$, $p < .0083$; *Bonferroni*]. Die anderen Bedingungen wurden dagegen nicht signifikant: [GES: $t(7) = 3.57$, $p = .009$; PFE: $t(7) = -.06$, $p = .95$; SIN: $t(7) = 1.93$, $p = .09$; STA: $t(7) = 3.25$, $p = .01$; WÖR: $t(7) = -.73$, $p = .49$; *Bonferroni*]. Für die Kontrollgruppe 2 wurde dagegen kein Paarvergleich statistisch bedeutsam: [GES: $t(9) = 1.54$, $p = .16$; OBJ: $t(9) = -3.05$, $p = .01$; PFE: $t(9) = .63$, $p = .55$; SIN: $t(9) = 2.03$, $p = .07$; STA: $t(9) = -1.03$, $p = .33$; WÖR: $t(9) = -.64$, $p = .54$; *Bonferroni*]. Die Interpretation der *Haupteffekte* „Lateralität“ ist aufgrund der fehlenden statistischen Bedeutsamkeit in beiden Gruppen unzulässig.

Die Abbildung 6.3 zeigt das Verhältnis der Anzahl aktivierter Voxel in der rechten und linken Hemisphäre anhand des Lateralitätsindex auf Basis gemittelter Voxelanzen.

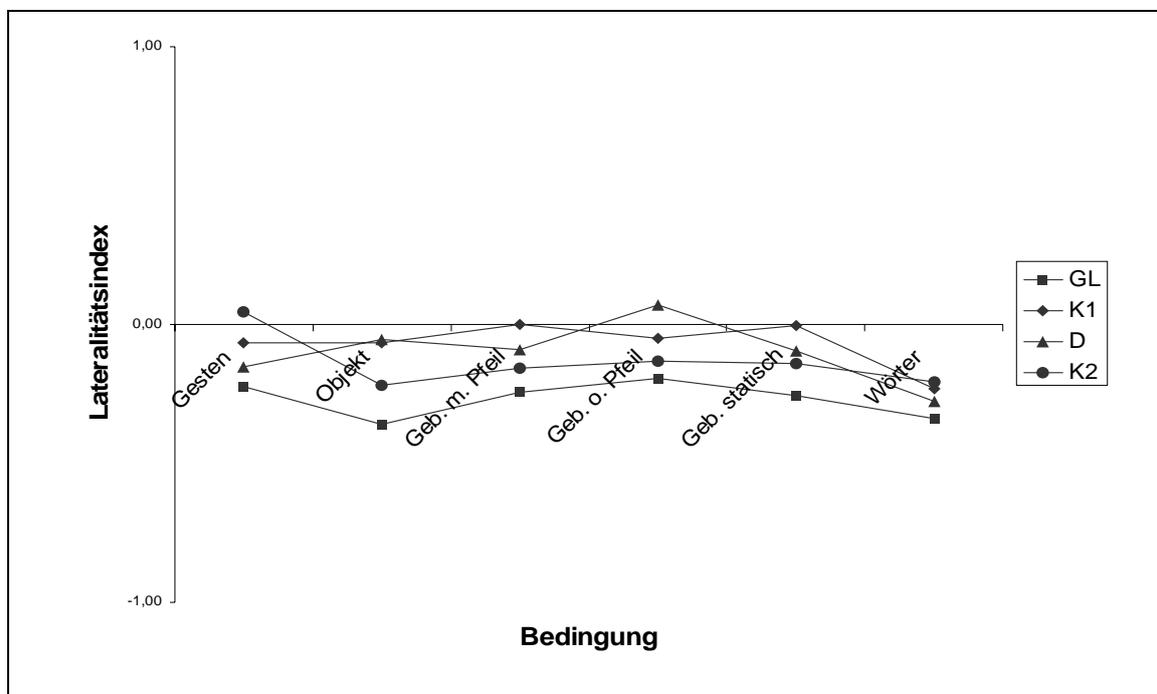


Abbildung 6.3:

Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *ventraler Pfad*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen.

In Hypothese 5 wurde für alle vier Gruppen eine hohe Beteiligung beider Hemisphären an der Gesamtaktivierung erwartet. Diese Hypothese konnte bestätigt werden, da keine der vier Gruppen signifikante Unterschiede zwischen der linken und der rechten Hemisphäre aufwies und somit keine Überlegenheit einer Hemisphäre vorliegt. Außerdem wurde erwartet, dass für die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher die Aktivierungen in der linken Hemisphäre bei den bekannten Kategorien dominieren (Hypothese 6). Diese Annahme konnte zumindest für die Gruppe der Gehörlosen im Sinne einer empirischen Tendenz bestätigt werden, für die Gebärdensprachdolmetscher dagegen nicht. Die Hypothese 6, dass die Aktivierungen in den Kategorien *Gesten*, *Wörter* und *Objekte* auf eine linkshemisphärische Verarbeitung schließen lassen (für K1 und K2), kann anhand grafischer Darstellung bis auf die Bedingung *Gesten* für die Kontrollgruppe 2 für beide Kontrollgruppen unterstützt werden, wie in der Abbildung 6.3 dargestellt ist. Die statistischen Tests belegen die aufgestellte Hypothese allerdings nicht.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang I auf der beigelegten CD.

6.4 Ergebnisse in Bezug auf den Gyrus praecentralis

6.4.1 Ergebnisse bezüglich der Hypothesen 7 und 8

Die Aktivierungen der Gehörlosen im Gyrus praecentralis fallen gegenüber denen der anderen drei Gruppen auf. Bei dieser Gruppe rief keine der sechs Kategorien Aktivierungen im Motokortex hervor (vgl. Tabelle 6.19). Ausnahme ist die Aktivierung in der Kategorie *Objekt*, die aber aufgrund der sehr geringen Voxelanzahl vernachlässigt werden kann.

Im Gegensatz dazu konnten Aktivierungen im Gyrus praecentralis für die Gruppen *Kontrollgruppe 1*, *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* für alle sechs Kategorien nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 6.20, Tabelle 6.21, Tabelle 6.22). Bei keinem der beiden Gruppenpaare zeigte der Vergleich zwischen den einzelnen Gruppen Unterschiede bezüglich der Aktivierungen, weswegen auf eine tabellarische Darstellung verzichtet wurde.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang K auf der beigefügten CD.

In Abschnitt 6.4.2 werden genauere Angaben zum Lateralitätsindex gemacht, obwohl diesbezüglich keine Hypothesen formuliert wurden. Zur Vollständigkeit werden die statistischen Tests mit aufgeführt.

1. Gruppenpaar: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Tabelle 6.19: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gehörlosen*

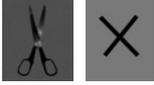
Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	4,60	0.0013	4	-48	-13	42
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L			n. s.			

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.20: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 1*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxelanzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	6,79	0.000048	24	-51	-7	46
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	7,89	0.000013	18	-48	-10	43
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	5,73	0.00019	12	-51	-7	46
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	6,69	0.000054	16	-45	-13	47
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	9,39	0.000003	12	-51	-7	46
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
	R	5,38	0.00031	20	42	-16	42
	L	7,37	0.000024	35	-51	-7	43

* Anzahl der Voxel von 3x3x3 mm³ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster (p < 0.005)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

2. Gruppenpaar: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Tabelle 6.21: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der *Gebärdensprachdolmetscher*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
 	R	6,29	0.00041	4	33	-25	64
	L	7,16	0.00018	8	-42	-13	55
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
 	R	6,12	0.00048	4	42	-13	52
	L	6,75	0.00027	8	-42	-13	55
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	6,20	0.00045	22	-42	-13	55
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	6,62	0.0003	6	-42	-13	55
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	6,98	0.00022	13	-42	-19	37
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
 	R			n. s.			
	L	9,05	0.000041	36	-48	-18	37

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Tabelle 6.22: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der *Kontrollgruppe 2*

Kontrast	Seite	T-Wert	p-Wert	Voxel-anzahl*	Koordinaten**		
					x	y	z
Gesten versus Baseline (Kreuz)							
	R	7,20	0.000051	4	47	-10	42
	L	5,06	0.00069	29	-57	-8	46
Objekt versus Baseline (Kreuz)							
	R			n. s.			
	L	5,03	0.00071	10	-49	-11	55
Gebärden m. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R	6,37	0.00013	11	37	-16	55
	L	7,63	0.000032	36	-39	-19	55
Gebärden o. Pfeil versus Baseline (Kreuz)							
	R	5,51	0.00038	8	37	-16	55
	L	7,90	0.000024	28	-49	-12	49
Gebärden statisch versus Baseline (Kreuz)							
	R	8,26	0.000017	10	47	-10	43
	L	6,49	0.00011	14	-48	-10	46
Wörter versus Baseline (Kreuz)							
	R	5,79	0.00026	5	47	-10	46
	L	6,54	0.00011	26	-45	-13	52

* Anzahl der Voxel von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe

** die Koordinaten repräsentieren den signifikanten Schwerpunkt der 3D-Cluster ($p < 0.005$)

n. s. = nicht signifikante Aktivierungen

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich die beiden aufgestellten Hypothesen bezüglich des Gyrus praecentralis (vgl. Hypothesen 7+8, Abschnitt 4.4) nicht bestätigen lassen, da die hörenden Kontrollgruppen auch auf Kategorien ohne bewegungsinduzierenden Inhalt Aktivierungen im Gyrus praecentralis zeigten und die Gehörlosen auf keine der Kategorien Aktivierungen aufwiesen. Ebenso weisen die Gebärdensprachdolmetscher Aktivierungen in allen sechs Kategorien gegen Baseline auf, obwohl wir, Bezug nehmend auf die Hypothese, nur Aktivierungen in den Kategorien *Wörter* und *Objekte* erwartet hatten. Folglich kann die Hypothese auch für diese Gruppe nicht bestätigt werden.

Um genaue und statistisch gesicherte Angaben zur Verteilung der Aktivierungen im Gyrus praecentralis machen zu können, werden die Ergebnisse im nächsten Abschnitt hinsichtlich der Lateralität untersucht (es wurde bezüglich dieser Fragestellung keine Hypothese formuliert).

6.4.2 Lateralisierungsmuster der Aktivierungen im Gyrus praecentralis

Obwohl keine explizite Hypothese bezüglich der Lateralisierungsmuster aller Gruppen im Gyrus praecentralis formuliert wurde, wird das Muster der Aktivierungen hier vorgestellt, um Vollständigkeit zu gewährleisten.

Für die Gruppen *Kontrollgruppe 1*, *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* (vgl. Tabelle 6.20, Tabelle 6.21, Tabelle 6.22) war in allen sechs Kategorien die linke Hemisphäre tendenziell häufiger aktiviert als die rechte Hirnhemisphäre. Allerdings muss differenziert werden: die *Kontrollgruppe 1* und die *Gebärdensprachdolmetscher* weisen eine sehr geringe Beteiligung der rechten Hemisphäre auf (vgl. Tabelle 6.20, Tabelle 6.21). Bei der *Kontrollgruppe 2* kann man dagegen eine relativ hohe Beteiligung der rechten Hemisphäre feststellen (vgl. Tabelle 6.22).

Bei der Gehörlosengruppe zeigte sowohl der *Haupteffekt* „Lateralität“ [$F(1,9) = 17.25, p < .05$] als auch die *Interaktion* „lat*bedingung“ [$F(5,45) = 17.25, p < .05$] signifikante Resultate. Bei Betrachtung aller durch die Paarvergleiche entstandenen Trends zeigte sich, dass lediglich eine Bedingung (Objekte) ausgeprägt war, die anderen fünf Bedingungen zeigten aufgrund fehlender Aktivierungen hybride Interaktionen. Da das signifikante Ergebnis auf nur einer Bedingung beruht, ist der Haupteffekt „Lateralität“ folglich nicht sinnvoll interpretierbar und es kann nicht angenommen werden, dass es sich bei den Gehörlosen trotz eines signifikanten Ergebnisses um linkslateralisierte Aktivierungsmuster handelt.

Für die Kontrollgruppe 1 wurde der *Haupteffekt* „Lateralität“ ebenfalls statistisch bedeutsam [$F(1,10) = 65.85, p < .05$]. Die *Interaktion* „lat*bedingung“ wies ein ebenfalls signifikantes Ergebnis auf [$F(5,50) = 5.21, p < .05$]. Der Haupteffekt wurde für folgende Bedingungen signifikant: [GES: $t(10) = -6.91, p < .0083$; OBJ: $t(10) = -8.38, p < .0083$; PFE: $t(10) = -5.02, p < .0083$; SIN: $t(10) = -5.63, p < .0083$; STA: $t(10) = -9.06, p < .0083$; *Bonferroni*]. Für die Kategorie *Wörter* zeigte sich lediglich eine Tendenz [$t(10) = -3.17, p = .01$; *Bonferroni*]. Für alle Paarvergleiche zeigten sich ordinale Interaktionen. Folglich ist der *Haupteffekt* „Lateralität“ trotz der ebenfalls signifikanten *Interaktion* „lat*bedingung“ interpretierbar. Für die *Kontrollgruppe 1* kann man folglich ein linkslateralisiertes Muster in den Aktivierungen bezüglich der sechs Bedingungen vermuten.

Auch für die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher wurde sowohl der *Haupteffekt* „Lateralität“ [$F(1,7) = 36.06, p < .05$] als auch die *Interaktion* „lat*bedingung“ [$F(5,35) = 30.82, p < .05$] signifikant. Bis auf die Bedingung *Objekt* [$t(7) = -2.35, p = .05$;

Bonferroni] wurden alle Bedingungen bezüglich des Haupteffektes statistisch bedeutsam: [GES: $t(7) = -4.17, p < .0083$; PFE: $t(7) = -6.04, p < .0083$; SIN: $t(7) = -6.95, p < .0083$; STA: $t(7) = -7.96, p < .0083$; WÖR: $t(7) = -11.40, p < .0083$; *Bonferroni*]. Da aber alle Paarvergleiche ordinale Interaktionen aufweisen, lässt sich der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ sinnvoll interpretieren. Das bedeutet, dass auch die Gebärden Sprachdolmetscher signifikant höhere Aktivierungen in der linken Hemisphäre als in der rechten aufzeigen.

Der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ wurde auch für die Kontrollgruppe 2 signifikant [$F(1,9) = 7.69, p < .05$]. Ebenso gilt dies für die *Interaktion* „*lat*bedingung*“ [$F(5,45) = 6.45, p < .05$]. Folgende Paarvergleiche zeigten den postulierten Trend entsprechend dem Haupteffekt: [OBJ: $t(9) = -3.70, p < .0083$; WÖR: $t(9) = -4.06, p < .0083$; *Bonferroni*]. Die anderen Bedingungen zeigten nicht signifikante Gegentrends [GES: $t(9) = -1.67, p = .13$; PFE: $t(9) = .48, p = .64$; SIN: $t(9) = .42, p = .69$; STA: keine Werte; *Bonferroni*]. Aufgrund hybrider Interaktionen bei den multiplen Paarvergleichen kann der *Haupteffekt* „*Lateralität*“ nur eingeschränkt interpretiert werden. Im Mittel über die sechs untersuchten Bedingungen zeigt die Kontrollgruppe 2 ein linkslateralisiertes Aktivierungsmuster. Diese Aussage gilt aber nicht generell für alle Aktivierungen dieser Gruppe.

Die Abbildung 6.4 zeigt das Verhältnis der Anzahl aktivierter Voxel in der rechten und linken Hemisphäre anhand des Lateralitätsindex auf Basis gemittelter Voxelanzahlen.

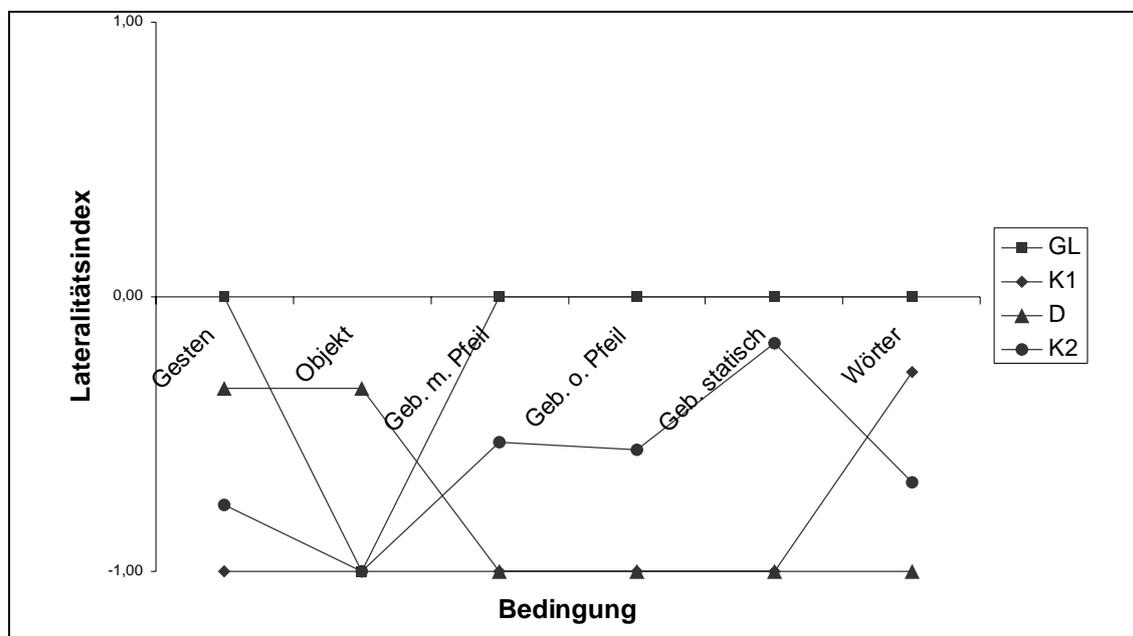


Abbildung 6.4:

Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im *Gyrus praecentralis*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen.

Für das Hirnareal Gyrus praecentralis wurde keine Hypothese bezüglich der Lateralität der Aktivierungen aufgestellt. Die Analysen wurden wegen der Vollständigkeit aber mit durchgeführt. Es lässt sich erkennen, dass die Gruppen Gebärdensprachdolmetscher, Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2 signifikant höhere Aktivierungen in der linken Hemisphäre aufweisen als in der rechten Hemisphäre. Bei der Gruppe der Gehörlosen reichte die Anzahl auswertbarer Bedingungen nicht, um Aussagen zum Lateralitätsmuster machen zu können. Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang L auf der beigefügten CD.

Die Ergebnisse der vier eben dargestellten Areale werden in Kapitel 7 diskutiert.

7 Diskussion des Bilder-Paradigmas: Wernicke-Areal, Broca-Areal, ventraler Pfad, Gyrus praecentralis

7.1 Diskussion der Untersuchungsergebnisse des Wernicke-Areals

Das Wernicke- sowie das Broca-Areal der linken Hemisphäre werden in der Literatur als klassische Areale für die Fähigkeit, Sprache zu verstehen und wiederzugeben, angegeben. Etwas allgemeiner formuliert, kann das Wernicke-Areal als eine wesentliche Struktur für Sprachverständnis und Sprachwahrnehmung sowie semantische und lexikalische Verarbeitung verstanden werden. Ausgehend von zahlreichen Studien (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991) scheint das Wernicke-Areal modalitätsunabhängige Funktionen zu erfüllen. Die Ergebnisse der genannten Studien können so interpretiert werden, dass das Wernicke-Areal an der Aufgabe des Sprachverständnisses bei hörenden und gehörlosen Menschen beteiligt ist. Daher ist davon auszugehen, dass die Sprachverarbeitung in diesem Areal unabhängig davon stattfindet, ob die relevanten Informationen akustisch oder visuell aufgenommen werden (= Modalitätsunabhängigkeit). In Anbetracht der Belege der gegenwärtigen Literatur werden für alle vier Gruppen Aktivierungen im Wernicke-Areal für die Kategorien, die von der jeweiligen Gruppe semantisch dekodierbar sind, erwartet (vgl. Abschnitt 4.1).

7.1.1 Die Aktivierungsmuster aller Gruppen im Wernicke-Areal

Die Aktivierungen für die Gruppe der Gehörlosen bestätigten die aufgestellte Hypothese, in der Aktivierungen auf die semantisch dekodierbaren Bedingungen im Wernicke-Areal erwartet wurden (vgl. Tabelle 6.1). Diese Aktivierungen treffen auf die Kategorien zu, von denen angenommen wird, dass sie für diese Gruppe semantisch dekodierbar waren. Das betrifft im Fall dieser Gruppe die Kategorien *Gesten*, *Objekte*, *Wörter*, *Gebärden statisch* und *Gebärden mit Pfeil*.

Eine ähnliche Fragestellung wurde von Neville et al. (1997, 1998) untersucht. Die Forschergruppe wies mehrfach die Involvierung klassischer Sprachareale bei der Verarbeitung der Muttersprache nach. In ihren fMRT-Untersuchungen wurden Hörenden

(Muttersprache: Englisch), Gehörlosen (Muttersprache: Amerikanische Gebärdensprache; später englische Schriftsprache erlernt) und bilingualen Hörenden englische Sätze und Gebärdensprachvideos dargeboten. Als Kontrollbedingung wurden jeweils englische Konsonanten und inhaltslose Gesten gezeigt. Alle Gruppen zeigten bei der Verarbeitung ihrer Muttersprache starke Aktivierungen in den klassischen Spracharealen der linken Hemisphäre. Die Resultate wurden von den Autoren dahingehend interpretiert, dass nicht die Modalität der erlernten Muttersprache für die Aktivierung klassischer Sprachareale entscheidend ist, sondern der möglichst frühe Erwerb einer Sprache. Neben dem *Wernicke-Areal* umfassen auch bei Gehörlosen die klassischen Areale Aktivierungen in der linken Hemisphäre im *Broca-Areal*, im *STS (Sulcus temporalis superior)* und im *inferioren praecentralen Gyrus*, welche gleichermaßen bei der Verarbeitung von Lautsprache zu finden sind (vgl. Neville et al., 1997, 1998). Die Ergebnisse von Neville et al. (1997, 1998) decken sich bezüglich des Wernicke-Areals mit den hier gefundenen Ergebnissen. Das bedeutet konkret, dass die Ergebnisse dieser Studie, analog zu denen von Neville et al. (1997, 1998) belegen, dass die Verarbeitung von Gebärdensprache in den klassischen Spracharealen stattfindet, die auch an der Verarbeitung von Lautsprache beteiligt sind. Auch die Ergebnisse der Studien von D'Hondt & Leybaert (2003) und Bavelier et al. (1998b) bestätigen anhand von weiteren Untersuchungen an prälinguistischen, gehörlosen Kindern die hier erhobenen Ergebnisse, dass die klassischen Sprachareale (u. a. Wernicke- und Broca-Areal) in der linken dominanten Hemisphäre auf die modalitätsunabhängige Verarbeitung von Sprache spezialisiert sind. Beide Forschergruppen fanden sowohl bei hörenden als auch bei gehörlosen Kindern die erwarteten Aktivierungen im linken Wernicke-Areal bei der Verarbeitung der jeweiligen Muttersprache. Die Studie von McSweeney et al. (2002b) bestätigt ebenfalls, dass das Wernicke-Areal im temporalen Kortex trotz auditiver Deprivation ein modalitätsunabhängiges, klassisches Areal bei der Verarbeitung von Gebärdensprache ist, dessen Aktivierung keiner Erfahrung mit auditiven Eindrücken bedarf (vgl. MacSweeney et al., 2002b). Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob grammatikalische und semantische Kenntnisse gebärdend oder sprechend entwickelt wurden. Die erwarteten Aktivierungen der Gehörlosen im Wernicke-Areal sind folglich hypothesenkonform und stimmen mit dem Stand der gegenwärtigen Literatur überein. Neben der Erwartung, dass sich Aktivierungen im Wernicke-Areal der Gehörlosen auf semantisch dekodierbare Bedingen zeigen, wurde angenommen, dass auch die rechte Hemisphäre an der Gesamtaktivierung beteiligt ist und sich folglich ein bilaterales Aktivierungsmuster ergibt (vgl. Hypothese 2). Neville et al. (1998) fanden in einer ihrer

Studien zusätzlich heraus, dass der Gebrauch einer räumlich-visuellen Sprache zu bilateralen Aktivierungen in den klassischen Spracharealen führt (vgl. Neville et al., 1998). In einer weiteren Studie von Bavelier et al. (1998b) wurden die untersuchten Gehörlosen aufgefordert, englische Sätze zu lesen. Im Ergebnis zeigte sich eine fehlende linkshemisphärische Asymmetrie, d. h. also ebenfalls bilaterale Aktivierungen. Neville et al. (1998) und Bavelier et al. (1998b) interpretierten ihre eigenen Ergebnisse dahingehend, dass die klassische linkshemisphärische Asymmetrie in der Aktivierung der Sprachareale Wernicke und Broca bei Gehörlosen, die neben der Gebärdensprache die Schriftsprache erlernt haben, verloren geht, was die nachgewiesene, starke Beteiligung der rechten Hemisphäre an den Verarbeitungsprozessen von Gebärdensprache beweist. Die linkshemisphärische Asymmetrie geht ebenfalls durch den Gebrauch der Gebärdensprache verloren. Es werden hypothetisch ebenfalls Aktivierungen in der linken *und* rechten Hemisphäre des Broca- und Wernicke-Areals vermutet, da die Gehörlosen alle das Lesen der Lautsprache beherrschten und eine räumliche Sprache benutzten. Die Ergebnisse zeigten in vier der sechs Kategorien die erwarteten Aktivierungen in der rechten Hemisphäre. Somit konnte in dieser Studie übereinstimmende Ergebnisse mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen bezüglich des Lateralitätsmusters der Gehörlosen im Wernicke-Areal gefunden werden.

Wie gerade kurz angedeutet, zeigten nicht alle Bedingungen die erwarteten Aktivierungsmuster. Zudem wurden neben den Kontrastierungen der einzelnen Bedingungen gegen die Baseline Kontraste zwischen zwei Bedingungen durchgeführt. Im Folgenden soll auf Ausnahmen und auf die Kontraste zwischen zwei Bedingungen eingegangen werden.

Es fiel zunächst auf, dass die Aktivierung bei der Kategorie *Gesten* statistisch nicht bedeutsam wurde. Bei den stichprobenartigen Benennungsabfragen nach der Untersuchung gaben die Gehörlosen für die Gesten korrekte Übersetzungen an (z. B. „Ich habe Durst.“ oder „Ich bin müde.“). Folglich wurde Wernicke-Aktivität postuliert, die aus der semantischen Dekodierung resultieren sollte und hier hätte auftreten müssen. Da die allgemein bekannten Körpergesten von allen Gruppen verstanden wurden und somit Aktivierungen im Wernicke-Areal hätten auftreten müssen, fehlt hier momentan ein Erklärungsansatz für diese fehlenden Aktivierungen.

Bei Betrachtung der Kontrastierungen zwischen zwei Bedingungen interessierte zunächst der Kontrast zwischen den Bedingungen *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil*. Für diesen

Kontrast wurde ein signifikantes Ergebnis auf Seiten der semantisch dekodierbaren Kategorie *Gesten* erwartet, wogegen für die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* aufgrund ihrer fehlenden Zuordnung zu einem korrekten Substantiv keine Wernicke-Aktivierungen erwartet wurden. Die fehlenden Aktivierungen dieser durchgeführten Kontrastierung auf Seiten der Kategorie *Gesten* könnten eine Folge der beschriebenen generellen Nichtaktivierungen in dieser Kategorie sein. Ein weiterer Erklärungsansatz wird im übernächsten Abschnitt vorgestellt.

Für die Kontrastbildung zwischen den Kategorien *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* zeigte sich die erwartete höhere Aktivierung bei der Kategorie *Gebärden statisch*. Diese Aktivierung bestätigt, dass die semantisch dekodierbare Kategorie *Gebärden statisch* zu Aktivierungen im Sprachverständnis-Areal führt. Die Aktivierungen sind höher als bei der semantisch nicht dekodierbaren Kategorie *Gebärden ohne Pfeil*, da diese Gebärdenbilder so manipuliert wurden, dass diese Bilder keine geläufige Gebärde darstellten.

Bei der Kontrastierung zwischen *Gebärden mit Pfeil* versus *Gebärden ohne Pfeil* wurde ebenfalls eine Mehraktivierung für die bekannten *Gebärden mit Pfeil* erwartet, da diese Bilder aus Lehrbüchern stammten und den Gehörlosen geläufig waren. Der Kontrast zeigte nicht die erwarteten, signifikanten Ergebnisse zugunsten der bekannten Kategorie *Gebärden mit Pfeil*. An dieser Stelle soll ein Ansatz aufgezeigt werden, der für die fehlenden Aktivierungen in diesem Kontrast und in dem oben beschriebenen Kontrast zwischen den Kategorien *Gesten* und *Gebärden ohne Pfeil* eine plausible Erklärung darstellt. Eine Studie von Mechelli, Gorno-Tempini und Price (2003) hat bisher belegt, dass die Darbietung unbekannter Reize zu einer erhöhten Aktivierung gegenüber den vertrauten Stimuli führt. Mechelli et al. (2003) boten dabei Versuchspersonen Wörter und Pseudowörter dar. Die Pseudowörter riefen deutlich stärkere Aktivierungen in den Arealen hervor, die für das Erkennen von lexikalischem Inhalt verantwortlich sind. Die Suche nach einem passenden, korrekten Wort aktivierte ebenfalls das Wernicke-Areal, welches bei Worterkennung aktiv ist. Die Suche und das Finden von lexikalischem Inhalt aktivieren folglich gleichermaßen das Wernicke-Areal (vgl. Mechelli et al., 2003). Vermutlich strengten sich die hier untersuchten Gehörlosen bei den dargebotenen Pseudogebärden (*Gebärden ohne Pfeil*) stark an, um aus dem eigentlich vertrauten Bildmaterial ein Wort zu entschlüsseln, da den Gebärden durch das Entfernen der Pfeile die eigentliche Bedeutung genommen worden war. Die aktive Wortsuche bei der dargebotenen, sinnlosen Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* könnte eine Erklärung für die fehlenden Aktivierungen sein. Die

Aktivierungen durch angestrengte Wortsuche bei *Gebärden ohne Pfeil* und die Aktivierungen durch Wortfindung bei *Gebärden mit Pfeil* mitteln sich dann vermutlich im Kontrast gegeneinander heraus.

Die fehlenden Aktivierungen der Kontrastbildung zwischen den Kategorien *Gebärden mit Pfeil* versus *Wörter* bestätigen dagegen die Erwartungen, dass beide Kategorien für die Gehörlosengruppe sprachlich verständlich waren und sich die Aktivierungen somit im Kontrast gegenseitig aufheben.

Die Aktivierungen der Kontrollgruppe 1 im Wernicke-Areal sind hypothesenkonform (vgl. Tabelle 6.2). Bis auf eine Ausnahme zeigten sich auch hier Aktivierungen im Sprachareal auf die Kategorien, die von dieser Gruppe semantisch klar zugeordnet werden konnten (Objekte, Gesten, Wörter). Die Aktivierungen bestätigen die Hypothese, dass semantisch dekodierbare Stimuli Aktivierungen im Wernicke-Areal hervorrufen, und die Ergebnisse stimmen mit der Literatur dahingehend überein. Die erwähnte Ausnahme bezieht sich auf die fehlende Wernicke-Aktivierung bezüglich der Kategorie *Objekt*. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Bedeutungen der dargebotenen Gegenstände, wie „Scherer“ oder „Brille“ von dieser Gruppe verstanden wurden und somit Sprachverarbeitung einsetzen müsste, kann dieses Phänomen zunächst nicht plausibel erklärt werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass potentielle Aktivierungen durch erfolgreiche Sprachverarbeitungsprozesse aufgrund der kleinen Stichprobe statistisch nicht bedeutsam wurden. Auf methodologische Probleme und Kritiken wird im Abschnitt 7.2.2.3 näher eingegangen.

Die tendenziell linkshemisphärische Asymmetrie der Aktivierungen für die Kontrollgruppe 1, die in der Hypothese 2 postuliert wurde, kann dagegen bestätigt werden. Ebenfalls erwartungsgemäß sind die fehlenden Aktivierungen bezüglich der Kategorie *Gebärden ohne Pfeil*, da diese Kategorie für die hörende Gruppe semantisch unverständlich war. Bei der Kontrastbildung zwischen den Kategorien *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* wurden zwei für die hörende Gruppe sinnlose Kategorien kontrastiert, was die fehlenden Aktivierungen auch beweisen. Des Weiteren bestätigen auch die Ergebnisse der Kontraste *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* und *Wörter* versus *Gebärden mit Pfeil*, dass die Mehraktivierungen auf Seiten der bekannten Kategorien *Gesten* und *Wörter* zu Sprachverständnis-Aktivierungen im Wernicke-Areal führen.

Der Gruppenvergleich zwischen den Gehörlosen und der Kontrollgruppe 1 ($GL > K1$) zeigt ebenfalls, dass die Gehörlosen im Gegensatz zu ihrer hörenden Kontrollgruppe die

drei Gebärdenkategorien *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch* semantisch entschlüsseln konnten und deshalb im Vergleich bei allen drei Kategorien stärkere Aktivierungen zeigten, als die Kontrollgruppe 1 (vgl. Tabelle 6.3). Der nicht dargestellte Gegenvergleich $K1 > GL$ wies erwartungsgemäß keine Mehraktivierungen für die Kontrollgruppe 1 auf.

An die Aktivierungen der Gebärdensprachdolmetscher im Wernicke-Areal wurden vergleichbare Erwartungen wie an die der Gehörlosen geknüpft. Die in Abschnitt 4.1 aufgestellte Hypothese 2 konnte bestätigt werden (vgl. Tabelle 6.4). Die Aktivierung in der sinnlosen und unbekanntem Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* ist mit frei assoziierten Wörtern und spontan hineininterpretierter Bedeutung erklärbar, was vermutlich ebenfalls zu Aktivierungen im Wernicke-Areal führt.

Der postulierte Teilaspekt eines erwarteten bilateralen Aktivierungsmusters bestätigte sich nicht, da die Gebärdensprachdolmetscher eine eindeutige linkshemisphärische Dominanz der Aktivierungen zeigten. Vermutlich reichten ihre Erfahrungen mit dem Gebrauch der Gebärdensprache nicht aus, um ein solches Muster zu zeigen. Leider war keine Studie zu finden, die derartige Aktivierungsmuster unterstützt. Es wäre aus diesem Grund vermutlich sinnvoll, mithilfe weiterführender Studien solche Fragen zu klären. So könnte man beispielsweise Gebärdensprachdolmetscher mit unterschiedlich gestuften Gebärdensprachkompetenzen prüfen, um zu eruieren, welchen genauen Einfluss Dauer und Intensität des Gebrauches der Gebärdensprache auf die Lateralisierungsmuster der Aktivierungen haben. Dadurch könnte festgestellt werden, welche gebärdensprachliche Kompetenz von Nöten ist, um ein linkslateralisiertes Muster der Aktivierungen in ein bilaterales Aktivierungsmuster zu überführen.

Für die fehlenden Aktivierungen im Vergleich *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* kann die gleiche Erklärung angeführt werden, die für die ebenfalls fehlenden Aktivierungen zwischen *Gebärden mit Pfeil* versus *Gebärden ohne Pfeil* bei den Gehörlosen beschrieben wurde. Vermutlich heben sich die Wortfindungs- und Wortsuch-Aktivierungen auf.

Die Kontraste *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden mit Pfeil* versus *Gebärden ohne Pfeil* zeigten hypothesenkonforme Mehraktivierungen zugunsten der sinnvollen Kategorien *Gesten* und *Gebärden mit Pfeil*. Allerdings könnte man erwarten, dass sich bei den beiden aufgeführten Kontrasten die Aktivierungen ebenso aufheben, wie es bei dem Vergleich *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* der Fall war, da es

sich auch bei diesen beiden Kontrasten um Interpretation versus aktiver Wortsuche handelt. Vermutlich sind die Kategorien *Gesten* und *Gebärden mit Pfeil* für die Gebärdensprachdolmetscher dennoch leichter und eindeutiger zu interpretieren, als die Kategorie *Gebärden statisch*. Das könnte dann in deutlich höheren Aktivierungen für diese beiden Kategorien resultieren, als die jeweiligen Wortsuch-Aktivierungen bei der Kategorie *Gebärden ohne Pfeil*.

Bei der Kontrastierung zweier sinnvoller Kategorien *Gebärden mit Pfeil* versus *Wörter* ergeben sich erwartungsgemäß keine statistisch bedeutsamen Aktivierungen.

Die Kontrollgruppe 2 zeigte wie die Gehörlosen und die Kontrollgruppe 1 erwartungsgemäß Aktivierungen im Sprachareal Wernicke (vgl. Tabelle 6.5). Wie bei den beiden vorangehenden Gruppen sind diese Aktivierungen mit dem gegenwärtigen Stand der Literatur vereinbar, die besagt, dass Verarbeitungsprozesse von semantischen Inhalten im Wernicke-Areal stattfinden. Somit kann die Hypothese 1 für die Kontrollgruppe 2 bestätigt werden. Die fehlenden Aktivierungen in den Kategorien *Gebärden mit Pfeil* und *Gebärden statisch* sind hypothesenkonform, da diese Kategorien der Kontrollgruppe 2 unbekannt waren und somit eine erfolgreiche Wort-Zuordnung und die damit verbundenen Aktivierungen im Wernicke-Areal nicht erwartet wurden. Zur Frage der Lateralisierung der Aktivierungen (Hypothese 2) lässt sich keine fundierte Aussage treffen, da sich bei einer zu geringen Anzahl von Kategorien Aktivierungen zeigten. Im Folgenden werden Ausnahmen und die Ergebnisse aus Kontrastierungen von zwei Gruppen dargestellt.

Die Ausnahme in den erwarteten Aktivierungsmustern bezieht sich auf die Kategorie *Wörter*. Hier müsste diese Gruppe Aktivierungen aufweisen, da vom Sprachverständnis ausgegangen werden kann. Es ließ sich gegenwärtig keine plausible Erklärung dafür finden. Aus diesem Grund wird auch der Kontrast *Wörter* versus *Gebärden mit Pfeil*, für den höhere Aktivierungen für die sinnvolle Kategorie *Wörter* erwartet wurden, statistisch nicht bedeutsam.

Der Kontrast *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* wurde ebenfalls entgegen der Erwartungen nicht signifikant. Fehlenden Aktivierungen solcher Art, wie sie schon mehrfach in den letzten Absätzen beschrieben wurden, könnte ein Phänomen zu Grunde liegen, das im Folgenden erklärt werden soll. Dabei sei bemerkt, dass zwei Möglichkeiten beschrieben werden, wobei der als Zweites beschriebene Fall (B) als Erklärung auf die eben angesprochenen, fehlenden Aktivierungen zwischen den Kategorien *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* zutrifft: Kontrastiert man zwei Bedingungen getrennt jeweils gegen

Die fehlenden Aktivierungen bei dem Vergleich der zwei sinnlosen Kategorien *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* sind dagegen hypothesenkonform.

Der Vergleich zwischen den Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* ($D > K2$) zeigt erwartungsgemäß bei allen sechs Kategorien keine Unterschiede in den Aktivierungen (vgl. Tabelle 6.6). Auch hier heben sich die Aktivierungen, die durch Wortfindung und Wortsuche in beiden Gruppen auftreten, gegenseitig auf. Der umgekehrte Vergleich zwischen diesen beiden Gruppen ($K2 > D$) weist ebenfalls keine Aktivierungen in einer der Kategorien zu Gunsten einer Gruppe auf, weswegen auf eine separate tabellarische Darstellung verzichtet wurde.

Fasst man die Ergebnisse aller vier Gruppen bezüglich der aufgestellten Hypothese 1 für das Wernicke-Areal zusammen, kann bestätigt werden, dass die vier Gruppen auf alle Bedingungen Aktivierungen im Wernicke-Areal zeigten, die sie semantisch dekodieren konnten (vgl. Abschnitt 4.1). In der überwiegenden Anzahl der untersuchten Vergleiche zeigte jede Gruppe die erwarteten Aktivierungen. Die Aktivierungsmuster sind analog zu denen zahlreicher Studien, die zeigten, dass im Wernicke-Areal semantische Verarbeitungsprozesse unabhängig von der Sprachmodalität stattfinden (vgl. Neville et al., 1997, 1998; D'Hondt & Leybaert, 2003; McSweeney et al., 2002b; Bavelier et al., 1998b). Aus diesem Grund werden die postulierten Aktivierungsmuster bei allen vier Gruppen bestätigt.

Ein weiteres, interessantes Ergebnis sind Aktivierungen in einigen Kategorien, die der jeweils betreffenden Gruppe unbekannt waren (z. B. Aktivierungen der Kontrollgruppe 1 bezüglich der Kategorie *Gebärden statisch*). Für diese, der jeweiligen Gruppe unbekannt Kategorien, wurden keine Aktivierungen im Wernicke-Areal erwartet, da diese mit semantischen Prozessen verbunden sind. Die dennoch vorhandenen Aktivierungen könnten mit einem Ansatz erklärt werden, der hier in der Diskussion bereits vorgestellt wurde: es klingt plausibel, dass bei der betreffenden Gruppe die Bildhaftigkeit des Stimulusmaterials zu frei erfundenen Assoziationen oder aktiver Wortsuche geführt hat und in die dargebotenen, unbekannt Stimuli hypothetische Bedeutungen hineininterpretiert wurden. Dieser Prozess sollte ebenfalls Aktivierungen im Wernicke-Areal hervorrufen, da dieses Areal Aktivierungen auf semantische Verarbeitungsprozesse unabhängig von der Richtigkeit der imaginierten Bedeutungen zeigt (vgl. Mechelli et al., 2003).

Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse bezüglich der Hypothese 2 (Verteilung der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre, vgl. Abschnitt 4.1) konnte diese nur für die Kontrollgruppe 1 und die Gehörlosen bestätigt werden. Laut der statistischen Berechnungen wurden das erwartete bilaterale Aktivierungsmuster für die Gebärdensprachdolmetscher und das erwartete linkslateralisierte Aktivierungsmuster für die Kontrollgruppe 2 statistisch nicht bedeutsam. Da die Grafiken, die auf den gemittelten Voxelanzahl-Werten über alle Personen einer Gruppe beruhen, die erwarteten Hypothesen tendenziell eher bestätigen, wäre es denkbar, dass die geringen Gruppenstärken und die daraus resultierenden schwerwiegenden Gewichtungen auf Ausreißern zu diesen Ergebnissen führen können. Um eindeutige Aussagen zu dieser Fragestellung machen zu können, müsste man eine erheblich größere Gruppe testen und möglicherweise auch mehr Kategorien anbieten.

7.2 Diskussion der Untersuchungsergebnisse des Broca-Areals

Wie schon unter Abschnitt 7.1 erwähnt, gehört das Broca-Areal neben dem Wernicke-Areal zu den klassischen Spracharealen für die Gebärden- und Lautsprachverarbeitung. Im Gegensatz zum Wernicke-Areal wird das Broca-Areal als Zentrum zur Sprachartikulation und Sprachproduktion verstanden. Analog zu den Ergebnissen bezüglich des Wernicke-Areals konnten dem Broca-Areal modalitätsunabhängige Funktionen bei der Sprachverarbeitung nachgewiesen werden (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991). Aufgrund der Ergebnisse der gegenwärtigen Literatur wurde postuliert, dass alle Versuchspersonen Broca-Aktivierungen auf die Bedingungen aufweisen, die sie semantisch dekodieren und in die sie folglich ein Wort hineininterpretieren können (vgl. Hypothese 3). Bezüglich der Verteilung der Aktivierungen auf die beiden Hemisphären wurde erwartet, dass die Gruppen, die die Gebärdensprache gebrauchen, höhere Aktivierungen auf der rechten Hemisphäre, also bilaterale Aktivierungsmuster, zeigen als die Gruppen, die keinen Kontakt zur Gebärdensprache haben. Für die Kontrollgruppen 1 und 2 wurden linkslateralisierte Aktivierungen erwartet (Hypothese 4; Abschnitt 4.2).

7.2.1 Die Aktivierungsmuster der hörenden Gruppen im Broca-Areal

Die Kontrollgruppe 1 zeigte erwartungsgemäß Aktivierungen im Broca-Areal (vgl. Tabelle 6.8). Diese Ergebnisse sind hypothesenkonform und stimmen mit der Literatur überein, da das Broca-Areal bei semantisch dekodierbaren Inhalten zur Sprachproduktion aktiviert wird (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991). Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass sich für diese Gruppe Aktivierungen bei allen sechs Kategorien zeigten, obwohl sie mit drei Kategorien nicht vertraut waren (*Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil*, *Gebärden statisch*) und diese auch aufgrund fehlender Gebärdensprachkompetenzen nicht korrekt dekodieren konnten. Diese Aktivierungen könnten mit freien Assoziationen bzw. Wortsuche erklärt werden. Das bedeutet, dass in die unbekannteren dargebotenen Bilder vermutlich automatisch ein Wort interpretiert wurde bzw. irgend eine Bedeutung zugeordnet wurde. Diese Assoziationen zeigen sich in Broca-Aktivierungen, da es für die internale Sprachproduktion nicht von Bedeutung ist, ob das interpretierte Wort richtig oder falsch ist.

Für die Vergleiche zwischen zwei Bedingungen zeigten die Vergleiche *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* und *Wörter* versus *Gebärden mit Pfeil* erwartungsgemäß Aktivierungen in der linken Hemisphäre, da eine jeweils semantisch-sinnvolle Kategorie gegen eine semantisch-sinnlose Kategorie kontrastiert wurde. Die Kategorien *Wörter* und *Gesten* führten folglich zu stärkeren Aktivierungen im Broca-Areal, da die hörende Kontrollgruppe 1 hier leichter die richtige Bedeutung entschlüsseln konnte. Die Kontrastierung zwischen zwei für diese Gruppe semantisch-sinnlosen Kategorien (*Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil*) führte dagegen zu keiner Aktivierung (vgl. Tabelle 6.8).

Bezüglich der Hypothese 4, in der ein linkshemisphärisches Aktivierungsmuster für die Kontrollgruppen im Broca-Areal postuliert wurde, kann diese für die Kontrollgruppe 1 bestätigt werden. In Tabelle 6.8 ist eine deutliche linkshemisphärische Asymmetrie der Aktivierungen zu erkennen. Das könnte so interpretiert werden, dass die linke Hemisphäre bei der Verarbeitung von Sprache dominant ist. Trotz der erkennbaren linkshemisphärischen Asymmetrie ist die rechte Hemisphäre dieser Kontrollgruppe relativ stark aktiviert. Da die Beteiligung der rechten Hemisphäre nur für Gruppen, die eine räumliche Sprache nutzen, erwartet wurde, findet sich gegenwärtig keine Ursache für dieses Lateralisierungsmuster bei der hörenden Gruppe.

Die Kontrastierung der Aktivierungen zwischen Kontrollgruppe 1 und den Gehörlosen (K1 > GL) zeigte eine größere Anzahl aktivierter Voxel im Broca-Areal zugunsten der

Kontrollgruppe 1, da die Gruppe der Gehörlosen keine Aktivierungen im Broca-Areal zeigte (vgl. Tabelle 6.9). Diese fehlenden Aktivierungen der Gehörlosen werden im nächsten Abschnitt diskutiert (vgl. Kapitel 7.2.2). Bei der Kontrastierung zwischen den beiden Gruppen fällt auf, dass sich die höheren Aktivierungen der Kontrollgruppe 1 gegenüber den Gehörlosen auf die linke Hemisphäre beschränkten. Dieses Muster unterstützt die Ergebnisse zahlreicher Studien, nach denen hörende und nicht-gebärdende Personen eine starke linkshemisphärische Dominanz bei der Verarbeitung und Produktion von Sprache aufweisen.

Für die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher zeigte sich ebenfalls ein hypothesenkonformes Aktivierungsmuster (vgl. Tabelle 6.10). Die Dolmetscher zeigten auf semantisch dekodierbare Kategorien Aktivierungen im Broca-Areal, die durch internes Verbalisieren der vermuteten Bedeutung hervorgerufen werden, wie in der Hypothese 3 auch postuliert wurde. Die nicht erwarteten Aktivierungen in der für diese Gruppe sinnlosen Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* lassen sich plausibel mit frei erfundenen und assoziierten Wörtern erklären, die ebenfalls Aktivierungen im Broca-Areal hervorrufen, da die Sprachproduktion unabhängig von der Richtigkeit der gedachten oder gesprochenen Wörter ist. Dagegen zeigte sich keine Aktivierung im Broca-Areal für die Kategorie *Gebärden statisch*. Vermutlich waren hier geringe Aktivierungen vorhanden, die aufgrund der sehr konservativen cut-off-Grenze statistisch nicht bedeutsam wurden.

Für die Vergleiche zwischen zwei Bedingungen zeigte der Vergleich *Gebärden statisch* versus *Gebärden ohne Pfeil* nicht die erwarteten Aktivierungen auf Seiten der erstgenannten, sinnvollen Kategorie. Vermutlich sind die fehlenden Aktivierungen der Kategorie *Gebärden statisch* gegen die Baseline dafür verantwortlich, die oben beschrieben wurden. Die Kontrastierung der semantisch-sinnvollen Kategorie *Gesten* gegen die semantisch-sinnlose Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* zeigte dagegen die erwarteten Aktivierungen auf Seiten der semantisch-sinnvollen Kategorie. Es wurde bei der Kontrastierung einer sinnvollen Kategorie gegen eine semantisch für die entsprechende Gruppe unsinnige Kategorie immer Aktivierungen auf Seiten der sinnvollen Kategorie erwartet, da Dekodierung in ein Wort Aktivierungen hervorruft. Inzwischen kann aufgrund der hier gefundenen Ergebnisse vermutet werden, dass es bei der Darbietung semantisch-unsinniger Kategorien zu starken Anstrengungen bezüglich einer Wortsuche kommen kann. Diese Anstrengungen sowie frei erfundene, hineininterpretierte Bedeutungen führen ebenfalls zu Aktivierungen in den klassischen Spracharealen. Dieser Ansatz könnte auch hier für die fehlenden Aktivierungen bei der Kontrastierung zwischen den Kategorien

Gebärden mit Pfeil versus *Gebärden ohne Pfeil* eine Erklärung sein. Dagegen wurde der Kontrast *Gebärden mit Pfeil* versus *Wörter* erwartungsgemäß nicht signifikant, da beide Kategorien von den Gebärdensprachdolmetschern dekodierbar waren, und sich die Aktivierungen beider Kategorien gegenseitig aufhoben (vgl. Tabelle 6.10).

Bezüglich der Hypothese 4 lassen die Aktivierungsmuster der Gebärdensprachdolmetscher auf eine linksdominante Verarbeitung der Stimuli und somit auf eine Sprachdominanz der linken Hemisphäre schliessen. Allerdings wurde ein stärker ausgeprägtes bilaterales Aktivierungsmuster erwartet (vgl. Hypothese 4; Abschnitt 4.2), da die Gebärdensprachdolmetscher die räumlich-visuelle Sprache im Alltag nutzen, was nach Angaben der Literatur zu einer höheren Beteiligung der rechten Hemisphäre an den Aktivierungen führt (vgl. Neville et al., 1998). Für die Gebärdensprachnutzer wurde aufgrund der Zunahme rechtshemisphärischer Aktivierungen durch den Gebrauch einer räumlichen Sprache eher bilaterale Aktivierungsmuster erwartet. Vermutlich reicht der Erfahrungsgrad der hier getesteten Gebärdensprachdolmetscher nicht aus, um das linkslateralisierte Aktivierungsmuster in ein stärker bilaterales zu verändern. Im Gegensatz zu den Gehörlosen gebrauchte diese Gruppe die Gebärdensprache noch nicht von Kindheit an.

Die Kontrollgruppe 2 zeigte hypothesenkonforme (Hypothese 3) Ergebnisse bezüglich der Broca-Aktivierungen (vgl. Tabelle 6.11). Wie bei den anderen Gruppen wird auch hier das Areal zur Sprachproduktion aufgrund des internalen Verbalisierens von semantisch relevantem Inhalt bzw. durch freie Interpretationen in die Kategorien, die der Kontrollgruppe eigentlich unbekannt waren, aktiviert. Die fehlenden Aktivierungen in der Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* könnten mit der fehlenden Kompetenz dieser Gruppe, die Bilder dieser Kategorie in ein Wort zu dekodieren, erklärt werden. Es ist allerdings verwunderlich, warum die Kontrollgruppe 2 dann Aktivierungen in den für sie ebenfalls sinnlosen Kategorien *Gebärden statisch* und *Gebärden mit Pfeil* aufweist. Wie eben angedeutet, lässt sich vermuten, dass mit diesen beiden Kategorien leichter beliebige Worte assoziierbar waren und diese Assoziationen mit, wenngleich falschen Worten, dann zu Broca-Aktivierungen führen. Dagegen gaben die Kontrollgruppen 1 und 2 auf Nachfrage an, dass die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* intuitiv am schwersten interpretierbar war.

Aus den fehlenden Aktivierungen der Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* resultierte dann auch die höhere Aktivierung der Kategorie *Gebärden statisch* in dem Kontrast *Gebärden*

statisch versus *Gebärden ohne Pfeil*. Für diesen Kontrast wurden keine Aktivierungen erwartet, da beide Kategorien für die Kontrollgruppe sinnlos sind. Der Kontrast *Gesten* versus *Gebärden ohne Pfeil* zeigte wie erwartet eine höhere Aktivierung auf Seiten der erstgenannten Kategorie, was die leichtere Erkennung und Interpretierbarkeit der dekodierbaren *Gesten* gegenüber der unbekannteren Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* beweist. Bei der Kontrastierung *Wörter* versus *Gebärden mit Pfeil* wurden Aktivierungen zugunsten der bekannten Kategorie *Wörter* erwartet. Vermutlich heben sich auch hier wieder Aktivierungen durch Wortsuche mit denen der Dekodierung auf. Die Kontrastierung zwischen den Gruppen Kontrollgruppe 2 versus Gebärdensprachdolmetscher ($K2 > D$) zeigte erwartungsgemäß keine statistisch bedeutsamen Ergebnisse in den sechs Kategorien, da beide Gruppen vergleichbar aktiviert waren und sich somit die Aktivierungen im Kontrast gegenseitig aufhoben (vgl. Tabelle 6.12).

Bezüglich der Hypothese 4, in der linkshemisphärische Aktivierungen bei der Verarbeitung der bekannten Stimuli postuliert wurden, konnten dieser Gruppe in fünf der sechs Kategorien die erwartungsgemäß stärkeren Aktivierungen in der sprachdominanten, linken Hemisphäre nachgewiesen werden. Allerdings wies die Kontrollgruppe 2 eine deutlich höhere Beteiligung der rechten Hemisphäre an der Gesamtaktivierung als die Gebärdensprachdolmetscher auf. Es kann dafür gegenwärtig keine plausible Erklärung gefunden werden. Die tendenzielle Verarbeitung dargebotener Stimuli in der linken, sprachdominanten Hemisphäre bleibt dennoch bestehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kontrollgruppen und die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher die aufgestellte Hypothese für das Broca-Areal bestätigten. Die Kontrollgruppen 1 und 2 zeigten in den meisten Kategorien Aktivierungen, da sie vermutlich auch in die ihnen unbekannteren Bilder Wörter frei assoziierten, und somit das Areal zur Sprachproduktion unabhängig von der imaginierten Bedeutung aktiviert wurde. Der Hypothese 4 nicht entsprechend waren die Aktivierungsmuster hinsichtlich der Lateralität. Hier zeigten die Kontrollgruppe 1 und die Kontrollgruppe 2 tendenziell hohe Mitaktivierungen der rechten Hemisphäre. Bei den Gebärdensprachdolmetschern wurden dagegen fast ausschließlich Aktivierungen in der linken Hemisphäre gefunden. Dennoch zeigte sich bei allen Gruppen die erwartete linkshemisphärische Asymmetrie bei der Verarbeitung von Sprache, da bei allen drei Gruppen die Anzahl aktiver Voxel in der linken Hemisphäre größer war, als in der rechten Hemisphäre.

7.2.2 Die Aktivierungsmuster der Gehörlosen im Broca-Areal

Wie in Kapitel 7.2.1 dargestellt, zeigten die Kontrollgruppe 1, Kontrollgruppe 2 und die Gebärdensprachdolmetscher die erwarteten Aktivierungen im klassischen Broca-Sprachareal bei der Verarbeitung dargebotener Stimuli. Die Betrachtung der Aktivierungsmuster der Gehörlosen im Broca-Areal erbrachte dagegen nicht-hypothesenkonforme Ergebnisse. Tabelle 6.7 zeigt, dass die Gruppe der Gehörlosen bei keiner der sechs gegen die Baseline (Kreuz) kontrastierten Bedingungen sowie bei keiner der zwischen zwei Kategorien vorgenommenen Kontrastierungen Aktivierungen im Broca-Areal aufweist. Folglich erbrachte der Vergleich zwischen der Gruppe der Gehörlosen und deren altersparallelisierter Kontrollgruppe 1 ($GL > K1$) ebenfalls keine signifikant-höheren Aktivierungen zu Gunsten der Gehörlosen.

Wie bereits mehrfach beschrieben, wird das Broca-Areal auch bei Gehörlosen als klassisches Sprachproduktions-Areal verstanden, dessen Aktivierung unabhängig von der erlernten Sprachmodalität nachgewiesen wurde (vgl. Nöth, 1992; Poizner et al., 1990; Bellugi & Klima, 1991). Da für die Gehörlosen ein zur inneren Verarbeitung von semantischen Inhalten bei Hörenden analoges, internes Verbalisieren' (inneres Vorsprechen ohne Mundbewegung oder Akustik) angenommen wurde, wurden vergleichbare Aktivierungsmuster zwischen beiden Gruppen postuliert (vgl. Hypothese 3; Abschnitt 4.2).

Im Folgenden sollen verschiedene Erklärungsansätze für das zu den hörenden Gruppen konträre Aktivierungsmuster der Gehörlosen vorgestellt werden.

Zunächst wird ausgeschlossen, dass die Gehörlosen die Aufgabenstellung oder die dargebotenen Inhalte nicht verstanden haben, da die stichprobenartigen Verhaltensdaten belegen, dass die Bilder identifiziert werden konnten. Von den stichprobenartigen Befragungen liegen leider keine systematischen Daten vor. Gegen die Möglichkeit, dass die Gehörlosen keine der Kategorien verstanden haben, sprechen auch die Aktivierungen im Sprachareal Wernicke (vgl. Tabelle 6.1). Dabei ist es für eine Aktivierung im Broca-Areal nicht von Bedeutung, ob die korrekte Bedeutung dekodiert oder eine falsche semantische Bedeutung hineininterpretiert wurde. Die nachstehenden Absätze stellen optionale Erklärungen für die fehlenden Broca-Aktivierungen der Gehörlosen vor.

7.2.2.1 Das Broca-Areal als modalitätsunabhängiges Sprachareal

Zahlreiche Aktivierungsstudien mit bildgebenden Verfahren haben die Rekrutierung des Broca-Areals für die lexikalische (den Wortschatz betreffend) und syntaktische (den Satzbau betreffend) Verarbeitung von Gebärdensprache nachgewiesen (vgl. Ronnberg et al., 2000; Klann et al., 2002; Neville et al., 1998; Soderfeldt et al., 1997; MacSweeney et al., 2001). Stellt man ein gemeinsames zugrunde liegendes neuronales Substrat für die Laut- und Gebärdensprache nicht in Frage und geht man von einer supramodalen Organisation des Broca-Areals aus, so muss eine Erklärung für die hier nicht-signifikanten Aktivierungen der Gehörlosen gefunden werden. Spekulativ könnte man annehmen, dass die geforderte Aufgabe damit in Zusammenhang steht. In Abschnitt 7.2.2.3 werden mögliche Auswirkungen verschiedener Aufgabenstellungen und Stimuli auf die Aktivierungen im Broca-Areal zwischen anderen Studien und dieser genauer diskutiert. Die hier gestellte Aufgabe lautete, sich die Bilder anzusehen und innerlich zu verbalisieren, ohne dabei aktiv zu gebärden oder zu sprechen. Nachsprechen und Nachgebärden wurden den Probanden wegen der Befürchtung von Bewegungsartefakten zu Lasten einer genauen Auswertung der Daten untersagt. Es wäre also denkbar, dass die Gehörlosen aufgrund dieses Verbotes das Broca-Areal überhaupt nicht rekrutieren, was bedeuten würde, dass der Verarbeitungsweg noch vor dem Gebrauch des Broca-Areals endet, oder in anderen Arealen fortgesetzt wird. Hätte man das aktive Nachgebärden zugelassen, wäre das Broca-Areal vermutlich aktiviert worden. In diesem Erklärungsansatz wird die Modalitätsunabhängigkeit des Broca-Areals nicht in Frage gestellt, sondern vermutet, dass die Gehörlosen aufgrund der Aufgabenstellung nicht zur adäquaten Nutzung dieses Areals gelangt sind, da das Broca-Areal für die Sprach*produktion* verantwortlich ist, die hier jedoch unterbunden wurde. Spekulativ könnte man annehmen, dass die Hörenden nicht um das innere Verbalisieren der gesehenen Inhalte umhin kommen. Dem entgegen stehend könnte es sein, dass sich die Gehörlosen die innere Ausführung der Gebärden und die dazugehörige Stellung der Hände im Raum nicht zwingend vorstellen, was dazu führt, dass das Broca-Areal in seiner Funktion nicht benötigt wird. Da diese Ergebnisse nicht erwartet wurden, fanden keine Nachfragen bei den Gehörlosen und Hörenden statt, anhand derer man genauere Aussagen zu den Verarbeitungswegen der Gehörlosen hätte treffen können. Die hier aufgeführte Erklärung könnte eine Möglichkeit sein, die fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal zu erklären. Um allerdings fundierte Aussagen treffen zu können, müsste diese Untersuchung erneut durchgeführt werden, ohne das Aussprechen oder

Nachgebärden der gedachten Wörter explizit zu unterbinden. In diesem Fall sollten dann die Gehörlosen Aktivierungen im Broca-Areal zeigen.

7.2.2.2 Das Broca-Areal als modalitätsabhängiges Sprachareal

Ein anderer Ansatz bestände in der Möglichkeit, dass sprachliche Funktionen *nicht* supramodal im Broca-Areal repräsentiert sind. Wäre das Broca-Areal, wie so häufig postuliert wurde, in jedem Fall modalitätsunabhängig, dann müsste jede Form der Sprachproduktion dort stattfinden. Selbst wenn man davon ausgeht, dass nur internes Nachgebärden der gesehenen, statischen Bilder realisiert wurde, müsste dadurch dennoch das Broca-Areal aktiviert werden. McGuire et al. (1997) zeigten bei gebärdenden Hörenden und Gehörlosen in einer PET-Studie, dass das interne Gebärden den linken inferioren frontalen Kortex mehr aktivierte als visuell-räumliche Areale. Die eruierten Aktivierungen waren vergleichbar mit denen, die bei der stillen Artikulation von Sätzen bei Hörenden gefunden wurden, was auch Shibata & Zhong (2001) nachweisen konnten (vgl. McGuire et al., 1997; Shibata & Zhong, 2001). Diese Studien unterstützen folglich die bisherigen Aussagen anderer Autoren, nach denen das Broca-Areal modalitätsunabhängig agiert und zeigen, dass jede Form der Sprachproduktion das Broca-Areal aktiviert.

Für die Vermutung, dass das Broca-Areal eventuell zum Teil modalitätsabhängig agiert, spricht eine von Horwitz et al. (2003) durchgeführte PET-Untersuchung an bilingualen und monolingualen Hörenden. Die Versuchspersonen mussten neben einer Ruhebedingung jeweils eine Geschichte gebärden oder erzählen, sowie selbstgebildete Laute mit dem Gaumen und den Lippen produzieren bzw. Bewegungen der Arme und Hände frei erfinden. Die Ausführung der letzten Aufgabe war frei von linguistischem Kontext. Die Autoren konnten nur im Brodmann-Areal 45, welches ein Teil des Broca-Areals ist, modalitätsunabhängige Aspekte der Sprachbildung nachweisen. Das Brodmann-Areal 44 (auch ein Teil des Broca-Areals) wurde dagegen nur bei der Bildung komplexer, artikulatorischer, oraler Bewegungen des Kehlkopfes aktiviert. Die gleichen sinnfreien Bewegungen der Arme und Beine, die analog zur den sinnfreien Lautbildungen waren, aktivierten dagegen nicht das Broca-Areal. Die Autoren vermuteten die Notwendigkeit von Geräuschen, die in die Sprachbildung mit einbezogen werden müssen und schlussfolgerten, dass nur ein Teil des Broca-Areals modalitätsunabhängig ist, nicht aber das gesamte Areal

(vgl. Horwitz et al., 2003). Auch von Karnath & Thier (2003) werden dem BA 45 modalitätsunabhängige Funktionen bei der Sprachbildung zugeschrieben. Das BA 44 stützt dagegen die strategische Kontrolle phonologischer Prozesse (vgl. Karnath & Thier, 2003). Da phonologische Prozesse auf Erfahrungen mit auditiven Eindrücken beruhen und mit dem Hören verbunden sind, könnte man auch für diese Untersuchung diesen Teil des Broca-Areales als modalitätsabhängiges Areal annehmen.

Vermutlich reichen dann die eventuell vorhandenen Aktivierungen im BA 45, welches den modalitätsunabhängigen Teil des Broca-Areals darstellt, nicht aus, um statistisch bedeutsame Aktivierungen zu zeigen.

Leider gibt die Vermutung, dass das Broca-Areal modalitätsabhängig aktiviert wird, und deshalb bei dieser Gehörlosen-Gruppe bei der dargebotenen Art von Stimuli nicht aktiviert wurde, keine befriedigende Antwort auf die Frage, in welchen Arealen Aktivierungen bei Gehörlosen stattfinden, wenn das klassische Sprachareal Broca deaktiviert bleibt. Eine Vermutung dafür wäre die Verarbeitung der Gebärdensprache außerhalb klassischer Sprachareale, was z. B. Aktivierungen in den supplementär motorischen Arealen oder im prämotorischen Kortex betreffen könnte. Dazu müssten weiterführende *whole-brain-Analysen* (Analyse aller Aktivierungen im gesamten Gehirn) durchgeführt werden, um herauszufinden, welche Areale bei den Gehörlosen gegenüber den Hörenden aktiviert werden. Diese Analyse wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da es den Rahmen einer übersichtlichen Darstellung interessanter Areale gesprengt hätte.

7.2.2.3 Methodologische Kritik und soziodemografische Unterschiede

In den letzten zwei Abschnitten wurden Ansätze aufgezeigt, welche die fehlenden Broca-Aktivierungen der Gehörlosen zu erklären versuchten. Möglicherweise hat zudem auch die Art des Stimulusmaterials Einfluss auf die gefundenen Ergebnisse.

Die bisher zitierten Studien fanden bei der Verarbeitung von Gebärdensprache im Gegensatz zu der hier durchgeführten Studie starke und wiederholte Aktivierungen in dem klassischen Sprachareal Broca. Deshalb muss an dieser Stelle zwischen den zitierten Paradigmen und diesem hier stattgefundenen unterschieden werden.

Nöth (1982) und Bellugi, Klima und Poizner (1988) arbeiteten mit Läsionspatienten, denen sie ganze Gebärdensprach-Sätze in einzelnen, statischen Bildern darboten. Die Aufgaben implizierten folglich auch grammatikalische Strukturen. Außerdem mussten die Patienten

Verständnisaufgaben lösen, was in der hier durchgeführten Studie nicht der Fall war. Die zitierten Studien fanden die erwarteten Aktivierungen im Broca-Areal, die vermutlich darauf zurückgeführt werden können, dass durch Abfragen die grammatikalischen Stimuli wirklich erwartungsgemäß verarbeitet wurden. In dieser Studie wurde dagegen keine Kontrolle der Imaginierung von Inhalten durchgeführt. Das könnte eine Begründung dafür sein, warum die Gehörlosen keine Aktivierungen im Broca-Areal zeigen. Damasio et al. (1986) und Bavelier et al. (1998b) boten gesunden Bilingualen sowie Hörenden mit Englischkenntnissen und Gehörlosen ganze Sätze in Gebärdensprache und Lautsprache dar und testeten direkt im Anschluss die Gebärdensprach- und Lautsprachkompetenz. Auch in dieser Studie konnte gewährleistet werden, dass sich an die Dekodierung semantischer Inhalte die Sprachproduktion anschließt, da im Gegensatz zu der hier vorliegenden Studie die Richtigkeit der Dekodierung überprüft wurde und sich damit die gefundenen Aktivierungen im Broca-Areal erklären lassen. Vergleichbar zum Stimulusmaterial der hier durchgeführten Studie boten Kassubek et al. (2004) ihren hörenden und gehörlosen Probanden statische Bilder von Alltagsgegenständen dar. Im Gegensatz zu der vorliegenden Studie sollten die Probanden aber jedes wahrgenommene Objekt in ihrer jeweiligen Muttersprache benennen. Die eigentliche Aufgabe bestand also in der Wortproduktion mit den Händen respektive dem Mund, was möglicherweise zu Aktivierungen im Broca-Areal führte. In den Untersuchungen von Neville et al. (1998), Soderfeldt et al. (1997) und MacSweeney et al. (2002b) wurde mit Darbietungen von bewegten Videosequenzen gearbeitet. Auch hier wurden ganze Sätze bzw. Zusammenhänge per Video dargeboten und somit auch Verben oder Adjektive. MacSweeney et al. (2002a) ließen ihre Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher während der Messungen sogar ganze Sätze aktiv in British Sign Language ausführen.

Das Stimulusmaterial und die Aufgaben der Probanden in den eben genannten Studien unterscheiden sich von der hier durchgeführten Studie deutlich. In den meisten Fällen wurden vollständige Sätze in bewegten Bildern dargeboten und das Verständnis durch Benennungsaufgaben geprüft. Das könnte auch die Broca-Aktivierungen erklären, da die Produktion von Gebärden oder Wörtern Teil der Aufgabe war. In der vorliegenden Studie wurden den Gehörlosen dagegen statische, schwarz-weiße Bilder von Gebärden, Gesten oder Objekten dargeboten. Jedes Bild lief auf ein Substantiv hinaus. Jegliche Formen von Tier-, Werkzeug- oder Kleinkindbildern wurden nicht gezeigt. Die Aufgabe lautete, sich die Bilder konzentriert anzuschauen, und deren Bedeutung innerlich zu verbalisieren. Dieses innerliche Verbalisieren sollte zu Aktivierungen im Broca-Areal führen, weswegen

auch die Hypothese 3 dahingehend formuliert wurde. Es kann aber nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass die Gehörlosen wirklich verbalisierten. Des Weiteren wäre es möglich, dass eine solch leichte und kurze Aufgabe von den Gehörlosen ohne Mühe realisiert werden konnte und die Anstrengung nicht reichte, um Aktivierungen im Broca-Areal hervorzurufen. Die Aktivierungen der hörenden Gruppen im Broca-Areal widersprechen dieser Annahme allerdings. Vermutlich sind die fehlenden grammatikalischen Strukturen sowie die nicht ausreichend langandauernde und repetitive Darbietung der Stimuli für diese Ergebnisse mitverantwortlich.

Sowohl den Gehörlosen als auch den Hörenden wurde eine Mitbewegung der Hände oder des Mundes untersagt. Die fehlende Aufforderung zur Produktion von Gebärden oder Wörtern könnte eine zusätzliche Erklärung für die fehlenden Broca-Aktivierungen der Gehörlosen in allen sechs Kategorien sein. Im Gegensatz zu einigen durchgeführten PET-Studien (vgl. Horwitz et al., 2003) wurden in der hier durchgeführten Studie keine Bewegungen der Hände oder des Mundes zugelassen, da das hier angewandte fMRT-Verfahren sehr sensitiv gegenüber Bewegungsartefakten reagiert und die Daten nicht aufgrund inakzeptabler Bewegungsartefakte verworfen werden sollten.

Aufgrund des genutzten Block-Designs war es außerdem nicht möglich, nach jedem Stimulus das Verständnis der Probanden zu prüfen, was ebenfalls eine Möglichkeit zur Durchführung eines solchen Paradigmas ist. Vorstellbar wäre folglich, das Paradigma erneut nicht im Blockdesign, sondern mittels *event-related-Paradigma* nach jedem Stimulus das Verständnis für den gezeigten Stimulus zu prüfen und somit die erwarteten Aktivierungen im Broca-Areal zu erhalten.

An dieser Stelle sei noch auf ein weiteres Problem hingewiesen, welches schon in Kapitel 3.2.2.1 kurz skizziert wurde. Bei der Erhebung der soziodemografischen Daten fielen innerhalb der Gruppe der Gehörlosen große Unterschiede bezüglich folgender Punkte auf:

- Zeitpunkt des Eintritts der Gehörlosigkeit
(Angaben: zwischen 0 – 11 Jahren)
- Erwerb der Primärsprache (Lautsprache oder Gebärdensprache)
(Angaben: z. T. Lautsprache, z. T. Gebärdensprache)
- Zeitpunkt des Erlernens der Gebärdensprache
(Angaben: zwischen dem 3. und 12. Lebensjahr)
- Bezugsperson, von der die Gebärdensprache erlernt wurde (Lernvorbilder)
(Angaben: Eltern, Erzieher im Kindergarten, Lehrer in der Schule, andere Kinder)

Es ist in dieser Studie leider nicht gelungen, der Forderung nach einer homogenen Gruppe bezüglich der verschiedenen Merkmale von Gehörlosigkeit (z. B. Unterschiede im Zeitpunkt des Eintrittes der Gehörlosigkeit, Ursachen der Gehörlosigkeit, hörende / gehörlose Eltern, Lernvorbilder-Umfeld, lautsprachliche versus gebärdensprachliche Erziehung etc.) gerecht zu werden. Die fehlende Homogenität innerhalb der Gruppe bezüglich der eben aufgeführten Punkte könnte eine weitere Ursache für die divergenten Ergebnisse zwischen Hörenden und Gehörlosen im Broca-Areal sein. Da es bezüglich vieler, wichtiger Gruppenmerkmale schwierig ist, eine homogene Gehörlosengruppe zu finden, sollte dieser Punkt bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann die für das Broca-Areal aufgestellte Hypothese 3 bezüglich der Gehörlosen-Gruppe nicht bestätigt werden, dass alle Gruppen Aktivierungen im Broca-Areal auf die Kategorien zeigen, die sie semantisch dekodieren können, da die Dekodierung zu Sprachproduktionsprozessen führt. Das hätte für die Gruppe der Gehörlosen in fünf der sechs Kategorien der Fall sein müssen. Da diese Gruppe keine Aktivierungen im Broca-Areal aufweist, lassen sich auch keine Aussagen zum bilateral vermuteten Aktivierungsmuster treffen. Für die fehlenden Aktivierungen wurden zwei Erklärungsansätze angeführt: das Broca-Areal als *modalitätsunabhängiges* Areal und das Broca-Areal als *modalitätsabhängiges* Areal. Zusätzlich wurden zahlreiche methodologische Punkte angeführt, die ebenfalls zu diesem Ergebnis beigetragen haben könnten. Es scheint die Erklärung plausibel, dass die Gehörlosen aufgrund der Aufgabenstellung (keine Ausführung der Gebärden), der Art der Stimuli (sehr kurz und sehr leicht diskriminierbar) und aufgrund des Ablaufes des Paradigmas (Block-Design) einen anderen Verarbeitungsweg als die hörenden Gruppen für die Verarbeitung der dargebotenen Stimuli aufweisen. Das "Wie" und "Wo" dieser Verarbeitungswege müsste in weiterführenden Studien, wie bereits beschrieben, erhoben werden. Dieser Ansatz widerspricht nicht dem Stand der gegenwärtigen Literatur, dass das Broca-Areal unabhängig von der Sprachmodalität aktiviert wird.

7.3 Diskussion der Untersuchungsergebnisse des ventralen Pfades

Neben der Darstellung der Ergebnisse des ventralen Pfades im Folgenden sei darauf hingewiesen, dass die Aktivierungen des ventralen Pfades noch einmal im Kontext der Aktivierungen des dorsalen Pfades in Kapitel 15.2 diskutiert werden, da diese Areale bei der Wahrnehmung von Objekten eng zusammenarbeiten.

Wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben, dient der ventrale Pfad vornehmlich der Wahrnehmung von Farbe und Form der Objekte. Diese Struktur ist an der Entscheidung beteiligt, um „was“ für ein Objekt es sich handelt (vgl. Milner & Goodale, 1993). Diese Funktion ist im Alltag wichtig, um das Gesehene Objekt identifizieren zu können. Bei genauerer Betrachtung der Funktionen des ventralen Pfades wird dessen Bedeutung für Gebärdensprachnutzer deutlich. Im ventralen Pfad werden neben der Objektdiskriminierung Gesichtsausdrücke und bekannte Handzeichen verarbeitet (= soziale Zeichen; also nicht-verbale Zeichen, die eine emotionale Bedeutung haben). Da die Gehörlosen beim Gebärden fortlaufend der Mimik des Gesprächspartners, dessen Handzeichen und Körperhaltungen ausgesetzt sind, nimmt der ventrale Pfad eine wichtige Rolle für die Verarbeitung von Gebärdensprache ein (vgl. Nakamura et al., 2004). Im Gegensatz zu nicht-gebärdenden Personen tragen Gesichtsausdrücke und Körperhaltung bei Gehörlosen entscheidend zum Verständnis des laufenden Gespräches bei. Das bedeutet, dass diese Komponenten für Gehörlose semantische Informationen enthalten, die in der sprachdominanten, linken Hemisphäre des ventralen Pfades verarbeitet werden (vgl. McCullough et al., 2005).

Aufgrund der Ergebnisse der gegenwärtigen Literatur werden hohe bilaterale Aktivierungen im ventralen Pfad für alle Gruppen erwartet, da das dargebotene Stimulusmaterial sehr komplex war und zahlreiche Informationen enthielt (Hypothese 5). Bei der Verarbeitung von semantisch-dekodierbaren Kategorien wurde erwartet, dass die sprachdominante, linke Hemisphäre stärker aktiv ist (Hypothesen 6; Kapitel 4.3).

7.3.1 Die Aktivierungsmuster aller Gruppen im ventralen Pfad

In Tabelle 6.13 ist deutlich zu erkennen, dass die Gruppe der Gehörlosen bei allen sechs Kategorien hohe Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im ventralen Pfad aufweist. Diese hohen Aktivierungen sprechen dafür, dass zur Diskriminierung der

dargebotenen Stimuli hohe Aufmerksamkeit erbracht werden musste, um alle relevanten Informationen herauszufiltern.

Hypothesenkonform sind die tendenziell höheren Aktivierungen in der linken, sprachdominanten Hemisphäre bei allen sechs Kategorien, die zwar in den statistischen Tests nicht signifikant wurden, aber tendenziell vorhanden waren.

Obwohl die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* keine semantische Bedeutung enthielt, weist das gleiche Aktivierungsmuster dieser Kategorie darauf hin, dass die Gehörlosen auch bei dieser Kategorie dennoch alle relevanten Merkmale (Form, Farbe, Gesichtsausdruck etc.) diskriminiert haben, um vermutlich im Resultat doch noch eine plausible Interpretation zu erhalten.

Die hohen Aktivierungen in der rechten Hemisphäre zeigen, dass die Gehörlosen die nicht-sprachlichen Informationen verarbeitet haben, wie z. B. Farben, Formen und soziale Körpersignale. Die linke Hemisphäre des ventralen Pfades ist dagegen vermutlich so hoch aktiviert, da die Kategorien zusätzliche Informationen über die Objekttypen enthalten, z. B. „raue Oberfläche“ oder „etwas sehr Langes“. Diese lexikalische Kategorisierung aktiviert die linke, sprachdominante Hemisphäre, die für die Verarbeitung solcher Informationen verantwortlich ist. Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass die linke Hemisphäre im ventralen Pfad eher für sprachliche Elemente (semantische Bedeutung) verantwortlich ist, wogegen die rechte Hemisphäre vorrangig an der Verarbeitung von Emotionen und Gesichtsausdrücken beteiligt ist (vgl. Nakamura et al., 2004). Für alle vier Gruppen enthalten die dargebotenen Stimuli soziale Zeichen. Für die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher sind diese aber sprachlich relevant und haben eher semantische Bedeutung. Dies könnte eine Erklärung für die höheren Aktivierungen in der linken Hemisphäre des ventralen Pfades sein. Diese beiden Gruppen sind in der Lage, aus den eben beschriebenen Merkmalen semantische Informationen zu entschlüsseln. So zeigen z. B. aufgeblasene Backen an, dass es sich nicht nur um ein Haus handelt, sondern um ein *großes* und *schönes* Haus. Diese semantische Informationsverarbeitung kommt ebenfalls der linken Hemisphäre zu, wogegen Gesichtsausdrücke für Nicht-Gebärdende soziale Signale sind, die in der rechten Hemisphäre verarbeitet werden.

Die Kontrollgruppe 1 zeigt erwartungsgemäß hohe bilaterale Aktivierungen im ventralen Pfad bezüglich aller sechs Kategorien, was auf Anstrengung bei der Objektdiskriminierung hinweist, die beide Hirnhälften aktiviert. (vgl. Tabelle 6.14). Auch bei dieser Gruppe werden folglich alle zu diskriminierenden Informationen des dargebotenen

Stimulusmaterials im ventralen Pfad verarbeitet. Dabei fallen generell erhöhte Aktivierungen in beiden Hemisphären im ventralen Pfad gegenüber der Gruppe der Gehörlosen auf, worauf später noch eingegangen wird.

Diese hörende Kontrollgruppe zeigt zudem hypothesenkonform die linksdominanten Aktivierungen in den Kategorien, die ihnen bekannt waren (*Gesten, Objekte, Wörter*). Entsprechend der Hypothese findet sich in den anderen, ihnen unbekannt Kategorien keine Überlegenheit der linken, sprachdominanten Hemisphäre. In den Kategorien *Gebärden mit Pfeil, Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch* sind die linke und rechte Hemisphäre gleichermaßen aktiviert. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die hörende Kontrollgruppe die Merkmale der drei letztgenannten Kategorien nicht semantisch verarbeiten konnte, sondern alle Informationen nicht-sprachlicher Natur waren, was zu dem bilateral gleich hohen Aktivierungsmuster führt.

Für die Kategorie *Wörter* zeigten sich nicht hypothesenkonform gleichermaßen hohe Aktivierungen wie bei den anderen Kategorien.

Bei der Kontrastierung der Kontrollgruppe 1 gegen die Gehörlosen ($K1 > GL$) zeigte sich, wie eben schon angesprochen, eine Mehraktivierung im ventralen Pfad (vgl. Tabelle 6.15) auf Seiten der Kontrollgruppe 1. Der Gegenvergleich ($GL > K1$) wies in keiner der sechs Kategorien Aktivierungen auf Seiten der Gehörlosen auf, weswegen auf eine Darstellung dieser Tabelle verzichtet wurde. Diese erhöhten Aktivierungen der hörenden Kontrollgruppe weisen darauf hin, dass sich die Hörenden vermutlich mehr auf die Objektmerkmale in den Bildern konzentrieren. Da sie die Hälfte aller Bilder nicht korrekt entschlüsseln konnten und ihnen diese Bilder unbekannt waren, legten sie vermutlich großen Wert auf alle Informationen, die sie den Bildern entnehmen konnten, um wenigstens ein ihnen plausibles Wort hineininterpretieren zu können. Diese Anstrengung schlägt sich in generell sehr hohen Aktivierungen nieder.

Die Aktivierungen der Gebärdensprachdolmetscher im ventralen Pfad weisen hypothesenkonform ebenfalls eine hohe Beteiligung beider Hemisphären bei der Verarbeitung von Objektmerkmalen auf (vgl. Tabelle 6.16). Dabei ist die linke Hemisphäre bei fünf der sechs Kategorien erwartungsgemäß stärker aktiviert, was auf die lexikalische und semantische Verarbeitung der relevanten Informationen, vergleichbar zur Gruppe der Gehörlosen, hindeutet. Analog zu den Gehörlosen stehen auch bei den Kategorien *Gebärden mit Pfeil* und *Gebärden statisch* die semantischen Bedeutungen der Objektmerkmale im Vordergrund. Folglich diskriminieren auch die Bilingualen

Gesichtsausdrücke und Körperhaltung in Bezug auf die Frage, welches Wort dahinter steht. Eine Ausnahme bildet die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* (sinnlose Kategorie), bei der die linke Hemisphäre geringer aktiviert ist als die rechte Hemisphäre. Dieses Aktivierungsmuster deutet darauf hin, dass diese Kategorie, die auch für die Gebärdensprachdolmetscher und Gehörlosen sinnlos war, Schwierigkeiten in der semantischen Dekodierung bereitete. Handzeichen, Gesichtsausdruck und andere soziale Zeichen waren nicht eindeutig zu einem Wort zuzuordnen, was sich in der fehlenden linkseitigen Asymmetrie der Aktivierungen zeigt.

Für die Kontrollgruppe 2 konnte die Hypothese, dass die Darbietung komplexer Bilder zu hohen Aktivierungen im ventralen Pfad führt, bestätigt werden (vgl. Tabelle 6.17). Ebenfalls erwartungsgemäß ist die Überlegenheit der sprachdominanten, linken Hemisphäre bei den Aktivierungen. Allerdings zeigen die Probanden der Kontrollgruppe 2, im Gegensatz zur Kontrollgruppe 1, die Lateralisierungen dieser Aktivierungen auch in den Kategorien, die ihnen nicht bekannt waren. Spekulativ könnte man vermuten, dass sie auch in die ihnen unbekannt Kategorien Bedeutungen frei hineininterpretiert haben. Vermutlich haben sie z. B. die Handhaltung beim Greifen an das Ohr mit dem Wort „Ohr“ assoziiert, obwohl es „Frau“ bedeutet. Dieser Hinweis kommt aus den unsystematisch erhobenen (mündlichen) Verhaltensdaten, in denen sich zeigte, dass einige hörende Probanden in die ihnen unbekannt Kategorien freie Bedeutungen interpretierten. Speziell die Kategorie *Gebärden statisch* schien bei den Kontrollgruppen problemlose Assoziationen zu vertrauten Wörtern hervorzurufen. Für die Aktivierungen in der linken Hemisphäre ist es wahrscheinlich nicht von Belang, ob das imaginierte Wort korrekt oder falsch ist, was sich mit den Ergebnissen der Literatur bezüglich der Aktivierungen im Broca- und Wernicke-Areal deckt.

Die Kontrollgruppe 2 zeigt in der Kategorie *Wörter* auffällig geringere Aktivierungen gegenüber den anderen Kategorien, was darauf hinweist, dass die Darbietung bloßer Wörter andere Verarbeitungsmuster hervorruft als z. B. ein Bild von einer Schere. Die Sprachverarbeitung beim Lesen ist von zwei unterschiedlichen Fällen geprägt. Zum einen kann das Wort im Gesamten dargeboten werden. Zum anderen kann die Darbietung Buchstabe für Buchstabe erfolgen. In dem in der vorliegenden Studie zutreffenden ersten Fall spielen visuelle Merkmale keine Rolle mehr, wenn das Wort in seiner Gesamtheit erkannt wurde (vgl. Carlson, 2004). Damit könnte die geringere Aktivierung gegenüber den anderen Bilderkategorien erklärt werden.

Die Kontrastierung der Gruppen Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe erbrachte in keine Richtung statistisch bedeutsame Ergebnisse ($K2 > D$ und $D > K2$). Tabelle 6.18 zeigt die Untersuchungsergebnisse für den Kontrast $K2 > D$. Die geringe Anzahl aktiver Voxel in dieser Tabelle für die Kategorie *Gebärden ohne Pfeil* kann aufgrund der sonst sehr hohen Aktivierungen im ventralen Pfad vernachlässigt werden. Vermutlich tragen zwei Gründe zu diesem nicht signifikanten Ergebnis bei: zum einen sind die Gebärdensprachdolmetscher nicht von Geburt an mit der Gebärdensprache vertraut, weswegen man auf ein zur hörenden Kontrollgruppe vergleichbares Aktivierungsmuster im ventralen Pfad schließen könnte. Zum anderen führten die freien Assoziationen der Kontrollgruppe 2 zu wahrscheinlich geringeren Aktivierungen in diesen Arealen, als bei der Kontrollgruppe 1. Bei der letztgenannten Gruppe sind die hohen Aktivierungen eventuell mit der starken Anstrengung, ein Wort zum gezeigten Bild zu finden, und einer genauen Diskriminierung aller Merkmale verbunden. Aus den eben genannten Gründen hoben sich wahrscheinlich die Aktivierungen der Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher und die der Kontrollgruppe 2 im Gruppenkontrast gegenseitig auf.

Folgende Ergebnisse können bezüglich der Aktivierungen im ventralen Pfad für alle vier Gruppen zusammengefasst werden:

Alle vier Gruppen zeigten die postulierten hohen bilateralen Aktivierungen im ventralen Pfad, was auf die Diskriminierung und Verarbeitung von Objektmerkmalen hinweist. Ebenfalls hypothesenkonform ist die tendenzielle und auf quantitative Daten gestützte, linkshemisphärische Asymmetrie der Aktivierungen für die Gruppen Gehörlose, Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 1 in den Kategorien, die von der jeweiligen Gruppe dekodierbar waren (vgl. Hypothese 5; Abschnitt 4.3). Diese Ergebnisse stützen die Theorien zahlreicher Studien, dass in der linken Hemisphäre des ventralen Pfades semantische Informationen zum Objekttyp verarbeitet werden. Außerdem belegt es die sprachrelevante Verarbeitung von sozialen Zeichen für die beiden gebärdenden Gruppen.

Die gefundenen Ergebnisse stimmen mit denen der Literatur überein, wenngleich anhand statistischer Prüfungen nicht alle Behauptungen zur Verteilung der Aktivierungen signifikant wurden. Die Anzahl der aktiven Voxel deuten aber tendenziell in die Richtung der aufgestellten Hypothesen. Gestützt werden diese Ergebnisse unter anderem durch die Studien von McCullough et al. (2005) und Nakamura et al. (2004). Sie wiesen nach, dass der Gesichtsausdruck ein wichtiges Element der Gebärdensprache ist, welches unter anderem in temporalen Strukturen verarbeitet wird. Es wurde im fMRT der zerebrale

Blutfluss von Hörenden ohne Gebärdensprachkenntnisse und Gehörlosen bei der Wiedererkennung von emotionalen und linguistischen Gesichtsausdrücken (Gesichtsausdruck mit einem Verb verbunden) gemessen. Während die Hörenden bilaterale Aktivierungsmuster im Gyrus fusiformis ausschließlich auf die emotionalen Ausdrücke zeigten, wiesen die Gehörlosen sowohl bei den emotionalen als auch bei den linguistischen Gesichtsausdrücken linkslateralisierte Aktivierungen auf (vgl. McCullough et al., 2005). Diese links-lateralisierten Aktivierungen der Gehörlosen könnte man als Hinweis darauf deuten, dass die Analyse von Gesichtern für einen Gehörlosen von hoher Bedeutung für das Sprachverständnis ist, da die Aktivierung in der linken Hemisphäre semantische Verarbeitungsprozesse andeuten.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann angenommen werden, dass Gehörlose während der Verarbeitung von Gebärdensprache immer die Gesichtsm Merkmale in Bezug auf semantische Informationen hin analysieren. Diese Herausfilterung semantischer Informationen aus den Gesichtsausdrücken könnte die Aktivierungen in der sprachdominanten linken Hemisphäre erklären. Die hörenden Kontrollgruppen betreffend könnte die ledigliche Herausfilterung von emotionalen Aspekten eine Erklärung für die eher bilateralen Aktivierungsmuster in den Kategorien darstellen, die diesen Gruppen unbekannt waren.

7.4 Diskussion der Untersuchungsergebnisse im Gyrus praecentralis

Anknüpfend an die Theorie, dass der Gyrus praecentralis sowohl bei der Vorstellung als auch bei der Beobachtung von Bewegungen aktiviert wird (vgl. Abschnitt 3.3.4), sollen hier die Untersuchungsergebnisse zum Gyrus praecentralis aller Gruppen diskutiert werden.

Die Tabellen 6.20, 6.21 und 6.22 zeigten, dass die Kontrollgruppe 1, die Gebärdensprachdolmetscher und die Kontrollgruppe 2 Aktivierungen des Gyrus praecentralis in allen sechs Kategorien aufweisen. Bei allen drei Gruppen fällt auf, dass die Aktivierungen in der linken Hemisphäre durchgängig höher sind als die der rechten Hemisphäre. Für die Kontrollgruppe 1 und die Gebärdensprachdolmetscher zeigen sich überwiegend linkshemisphärische Asymmetrie und sehr geringe Aktivierungen in der

rechten Hemisphäre. Die Kontrollgruppe 2 weist dagegen eine hohe Beteiligung der rechten Hemisphäre auf.

Auffällig sind die Aktivierungsmuster der Gehörlosen im Gyrus praecentralis. In Tabelle 6.19 ist zu erkennen, dass keine der sechs Kategorien Aktivierungen im Motokortex hergerufen hat, wenn man die sehr geringe Aktivierung in der Kategorie *Objekt* vernachlässigt.

Nachdem die Ergebnisse aller vier Gruppen kurz im Überblick dargestellt wurden, sollen zunächst einige Vermutungen zu den Aktivierungen der beiden hörenden Kontrollgruppen und der Gebärdensprachdolmetscher geäußert werden. Zunächst liegt die Vermutung nahe, dass die generell gefundenen Aktivierungen durch die Beobachtung von Bewegungen und / oder die internale Nachahmung dieser Bewegungen hervorgerufen wurden. Das Sehen von Handbewegungen oder Greifbewegungen nach Objekten oder Stellen am eigenen Körper und die dadurch ausgelösten Aktivierungen in den Arealen, die bei tatsächlicher Ausführung der beobachteten Bewegung aktiviert wären, können als plausible Erklärungen für die Aktivierungen im Motokortex angeführt werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den bisher gefundenen Ergebnissen der gegenwärtigen Literatur. So wiesen Aziz-Zadeh et al. (2001) neben zahlreichen anderen Autoren nach, dass die bloße Beobachtung von Bewegungen anderer Personen ausreicht, um Aktivierungen im Gyrus praecentralis hervorzurufen. In dieser Studie beobachteten sechzehn Rechtshänder per Video eine Hand, deren Zeigefinger sich auf einen Punkt zu- und wegbewegte. Die Ergebnisse stützen die Annahme, dass es zu motorischen Aktivierungen im Gyrus praecentralis kommt, auch wenn keine eigene, motorische Bewegung geschieht, sondern lediglich eine Bewegung bei einer anderen Person beobachtet wird (vgl. Aziz-Zadeh et al., 2001). Wie in einer weiteren Studie von Johnson-Frey et al. (2003) nachgewiesen wurde, spielt es dabei nicht einmal eine Rolle, ob die beobachtete Bewegung aktiv ausgeführt wird. Die Autoren konnten auch bei der Beobachtung statischer Bilder (Bilder von einem Werkzeug, das von einer Hand berührt wurde) durch Probanden ebenfalls Aktivierungen im Gyrus praecentralis nachweisen (vgl. Johnson-Frey et al., 2003).

Allerdings ist verwunderlich, warum die drei Gruppen (D, K1, K2) stärkere Aktivierungen in der linken Hemisphäre im Gyrus praecentralis aufweisen. Es ist bekannt, dass die Bewegungen der linken Körperhälfte von der rechten Hemisphäre gesteuert werden und umgekehrt. Bei genauerer Betrachtung des Stimulusmaterials fällt tatsächlich auf, dass in den meisten Fällen der dargebotenen Bilder die rechte Hand agiert. Auf zahlreichen Bildern, die beide Hände zeigen, ist die rechte, also die „Führungshand“, augenscheinlich

aktiv. In einzelnen Ausnahmefällen ist die linke Hand allein abgebildet. Man könnte also vermuten, dass tatsächlich die Beobachtung von statischen Bildern, die die rechte Hand in einer bewegungsinduzierenden Stellung darbieten, zu Aktivierungen der linken Hemisphäre, die die Bewegungen der rechten Hand steuert, führt. Eine Erklärung für die Mit-Aktivierungen in der rechten Hemisphäre wäre die Programmierung und Steuerung der vorgestellten Bewegungen, für die die rechte Hemisphäre verantwortlich ist. Die gesehenen angedeuteten Bewegungen werden nicht nur internal nachgeahmt, sondern dieses innere Bild einer vollständigen Bewegung muss ebenso programmiert und gesteuert werden. Vermutlich wären aus diesem Grund noch weitaus stärkere Aktivierungen in den SMA (supplementär motorische Areale) und dem prämotorischen Kortex zu finden.

Des Weiteren werfen die Aktivierungsmuster der beiden Kontrollgruppen (K1, K2,) weitere Fragen auf. In Hypothese 7 wurde postuliert, dass die Kontrollgruppen Aktivierungen im Gyrus praecentralis auf die Kategorien *Gebärden statisch*, *Gebärden ohne Pfeil*, *Gebärden mit Pfeil* und *Gesten* aufweisen würden. Die Gruppen zeigen aber die beschriebenen Aktivierungsmuster auf alle Kategorien, obwohl in den Kategorien *Objekt* und *Wörter* keine bewegungsprovozierenden Elemente enthalten waren. Man könnte aber vermuten, dass die internale Wortbildung hier eine Rolle spielt. Nicht nur die Vorstellung einer Bewegung der Hände induziert Aktivierungen im Gyrus praecentralis, sondern auch die Vorstellung des Aussprechens eines Wortes. Es wäre also möglich, dass die innere Sprachproduktion zu den Aktivierungen im Motokortex beiträgt. Da die Zentren zur Innervation der Muskeln für die Hände und jenen für die Zunge an verschiedenen Stellen des somatotop-organisierten Gyrus praecentralis liegen, sprechen die Koordinaten der signifikanten Schwerpunkte der Aktivierung in der Kategorie Wörter (für die Kontrollgruppe in der rechten Hemisphäre), die eher medial liegen, für diese Annahme. Diese Aktivierungsmuster im Gyrus praecentralis sind allerdings durch zu viele Ausnahmen charakterisiert, um einheitliche Interpretationen anzustellen. Um genaue Aussagen dazu treffen zu können, müssten weiterführende Analysen auf der Basis von Einzelpersonen durchgeführt werden.

Eine weitere zu klärende Frage sind die nicht hypothesenkonformen Aktivierungen der Gebärdensprachdolmetscher in allen sechs Kategorien. Laut der Hypothese 8 in Kapitel 4.4 wurden nur Aktivierungen in den Kategorien *Wörter* und *Objekte* erwartet. Es könnte spekulativ vermutet werden, dass die Aktivierungen in den Gebärdensprach-Kategorien ausschließlich auf innerlich gebildete Wörter (Sprachproduktion) zurückzuführen sind, oder die Verarbeitungsprozesse der Dolmetscher aufgrund fehlender lebenslanger

Erfahrungen eher denen der hörenden Nicht-Gebärdenden gleichen. Gegen die erste Vermutung spricht allerdings, dass die Aktivierungen in den Kategorien *Objekt*, *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch* nur auf der linken Hemisphäre statistisch bedeutsam wurden. Das würde bedeuten, dass die Vorstellung des Sprechens eines Wortes und die damit verbundene Innervation der Muskeln für Zunge und Lippen lateralisiert sind. Die Ansteuerung der Sprachproduktion mit dem Mund ist aber bilateral und nicht auf einer Hemisphäre dominant.

Es ist folglich wahrscheinlicher, dass die Gebärdensprachdolmetscher die Gebärdensprachbilder ähnlich wie ein Hörender ohne Gebärdenspracherfahrungen wahrnehmen. Das bedeutet, dass sie ebenfalls die Bewegung innerlich nachahmen müssen, um das entsprechende Wort zu finden. Nur steht bei ihnen am Ende dieser inneren Verarbeitung die Vorstellung einer korrekten Dekodierung, wogegen die Kontrollgruppen frei erfundene Bedeutungen in die nachgeahmten Bewegungen hineininterpretieren.

Die Gruppe der Gehörlosen zeigt entgegen aller Erwartungen in keiner der sechs Kategorien Aktivierungen im Gyrus praecentralis (vgl. Tabelle 6.19). Das könnte bedeuten, dass sich die Gehörlosen weder die Bewegung der Hände noch des Mundes vorgestellt haben. Bei fehlender Sprachproduktion und fehlender Nachahmung / Vorstellung der gesehenen bewegungsrelevanten Merkmale werden vermutlich weder das Broca-Areal noch der Gyrus praecentralis aktiviert. Obwohl die Hypothese 8 nur Aktivierungen in den Kategorien *Objekte* und *Wörter* postulierte, kann diese Hypothese nicht als bestätigt angenommen werden, da sich, bis auf die vernachlässigbar-geringen Aktivierungen in *Objekte*, keine Aktivierungen zeigten. Warum keine Aktivierungen auf die Stimuli erwartet wurden, die bewegungsrelevante Elemente enthielten, soll im Folgenden kurz skizziert werden: Auch die hier untersuchten Gehörlosen sind immerfort den von Aziz-Zadeh et al. (2001) beschriebenen Beobachtungen in einer Kommunikationssituation ausgesetzt: sie müssen stets die Hand- und Fingerbewegungen des Gesprächspartners beobachten, um den Gesamteindruck der aneinander gereihten Bewegungen in einen semantischen Kontext überführen zu können. Nicht nur die Eigenbewegung ist in der Gebärdensprache ein zentraler Aspekt; die dauernde Beobachtung von Fremdbewegungen ist ebenso entscheidend für das Verständnis von Gebärdensprache. Es kann vermutet werden, dass die Gehörlosen, die ständig Fremd- und Eigenbewegungen ausgesetzt sind, diese viel schneller und ökonomischer analysieren können und die Anforderung zu gering ist, um den Gyrus praecentralis zu aktivieren.

Zudem dekodieren sie die dargebotenen Bewegungsabfolgen in sehr kurzer Zeit sofort in das entsprechende Wort. Folglich müssen sie die Bewegung weder aufwändig analysieren oder nachahmen, da sie durch die gebärdensprachliche Kompetenz die Wortbedeutung entschlüsseln können, was den Personen, die keine Gebärdensprache beherrschen, verwehrt bleibt. Für die bewegungsrelevanten Gebärdenbilder wird also eine sofortige Überführung in das entsprechende Wort erwartet, wogegen die Kontrollgruppen diese vermutlich nachahmen müssen, um sich einen Sinn zu erschließen.

Außerdem stimmen die in Kapitel 7.2.2 besprochenen, fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal mit den hier fehlenden Aktivierungen im Gyrus praecentralis in folgender Hinsicht überein: dort wurde für die fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal vermutet, dass die Gehörlosen innerlich keine Wörter zu den dargebotenen Bildern verbalisieren. Wenn keine vorgestellte Sprachproduktion stattfindet, kann auch nicht das Areal zur Innervation der Muskeln des Sprechapparates aktiviert werden. Wenn die Gehörlosen aber weder Aktivierungen im Broca-Areal noch im Gyrus praecentralis bei der Verarbeitung von sprach- und bewegungsrelevanten Stimuli aufweisen, müssen andere Areale für deren Verarbeitung verantwortlich sein. Es wäre zudem denkbar, dass die internale Vorstellung der Bewegungen von Aktivierungen anderer Areale überlagert wird. Zur Untersuchung dieser Fragestellung müsste im gesamten Gehirn nach zusätzlichen Arealen gesucht werden, die nur bei den Gehörlosen im Gegensatz zu den Hörenden aktiviert wurden. Dies stellt einen guten Ansatz für weiterführende Untersuchungen dar, da die Klärung dieser Frage für die vorliegende Arbeit zu umfangreich wäre.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sich die beiden aufgestellten Hypothesen 7 und 8 für keine der Gruppen bestätigen lassen. Zwar zeigen die Kontrollgruppen 1 und 2 die erwarteten Aktivierungen in den Kategorien mit bewegungsrelevanten Informationen *Gesten*, *Gebärden mit Pfeil*, *Gebärden ohne Pfeil* und *Gebärden statisch*. Da beide Gruppen aber auch Aktivierungen in den Kategorien *Wörter* und *Objekte* zeigen, kann die Hypothese zumindest nicht im Sinne der imaginierten Nachahmung der bewegungsrelevanten Merkmale interpretiert werden, da diese beiden Kategorien keine bewegungsbezogenen Informationen enthalten. Vermutlich spielen hier auch Prozesse der internalen Sprachproduktion eine wesentliche Rolle.

Für die Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher kann die Hypothese 8 ebenfalls nicht bestätigt werden, da sich nicht nur Aktivierungen in den postulierten Kategorien *Wörter* und *Objekte* zeigen, sondern in allen sechs Bedingungen. Es wird vermutet, dass das

Aktivierungsmuster der Gebärdensprachdolmetscher analog zu denen der Kontrollgruppen ist, und somit auch bei dieser Gruppe Bewegungsvorstellungen bei den bewegungsbezogenen Kategorien ablaufen. Diese Ergebnisse stehen im Kontrast zu der Annahme, dass diese vier Kategorien aufgrund vorhandener Gebärdensprachkenntnisse sofort in die korrekte Wortbedeutung überführt werden, ohne sich die Bewegungen im Einzelnen vorstellen zu müssen. Bei den Gehörlosen kann die Hypothese 8 ebenfalls nicht bestätigt werden, da keine bedeutsamen Aktivierungen in den erwarteten Bedingungen zu finden waren. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die Gehörlosen Aktivierungen in Arealen zeigen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurden, da die Aktivierungen in anderen Arealen nicht vermutet wurden.

8 Grundlagen des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior

Wie schon in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, wird der primäre auditive Kortex aufgrund seiner besonderen Stellung für Gehörlose separat vorgestellt. Da diese Struktur sehr eng mit dem sekundären auditiven Kortex (= Wernicke-Areal) verbunden ist und die beiden in der Literatur häufig zusammen diskutiert wird, wird dieser erneut dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des Wernicke-Areals bisher unter den Aspekten der Sprachverarbeitung betrachtet wurden. Im Folgenden sollen sie unter Gesichtspunkten der kortikalen Reorganisation (vgl. Abschnitt 8.2) diskutiert werden.

8.1 Lage und Funktion

Lage

Die Gyri temporales transversi (Syn.: primäre Hörrinde; Heschl-Querwindungen) verlaufen an der dorsalen Fläche des Temporallappens quer zu allen anderen temporalen Gyri und nehmen das Brodmann-Areal 41 ein (siehe Abbildung 2.2). Der Gyrus temporalis superior (Syn.: sekundäre Hörrinde, Wernicke-Areal) grenzt lateral direkt an die primäre Hörrinde an und entspricht den Arealen 22 und 42 (vgl. Trepel, 1999). Die Abbildung 8.1 verdeutlicht die anatomische Lage dieser zwei Bestandteile des auditorischen Systems.

Bild 1

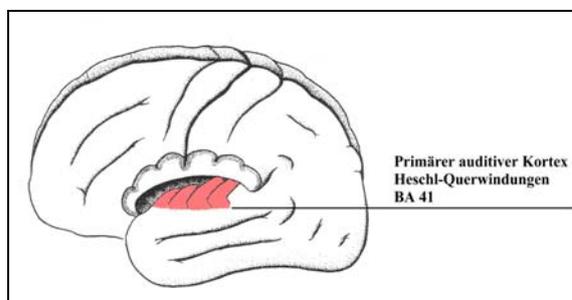


Bild 2

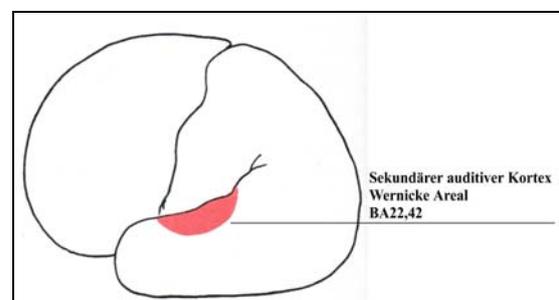


Abbildung 8.1:

Bild 1 Lateraler Sagittalschnitt: Gyri temporales transversi (primärer auditiver Kortex); **Bild 2** Sagittalschnitt: Gyrus temporalis superior (sekundärer auditiver Kortex) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 206, 1999)

Funktionen

Für die primäre Hörrinde stellt die im Abschnitt 2.3 beschriebene Hörbahn die wichtigste Afferenz dar. Die durch die Hörbahn übertragenen auditorischen Impulse erfahren in diesem Kortexareal eine interpretationsfreie Bewusstwerdung. Es werden keine Melodien oder Wörter, sondern nur einzelne Laute und Töne wahrgenommen. Die sekundäre Hörrinde erhält den Großteil ihrer Afferenzen aus der primären Hörrinde. Einzelne Laute erfahren hier eine interpretative Verarbeitung und werden als bereits bekannte Melodien oder Wörter erkannt. Dieser Prozess des Wiedererkennens setzt voraus, dass sich bei der Person im Laufe ihrer Entwicklung durch Lernprozesse Schaltkreise gebildet haben, die jetzt ein Zuordnen durch Erinnerung des Gehörten ermöglichen. Bei kongenitalen Gehörlosen ist die Ausprägung solcher Schaltkreise nicht möglich, da ihnen jegliche Höreindrücke fehlen und ihnen somit eine Zuordnung bzw. Verknüpfung zu Melodien und Wörtern auf diesem Weg verwehrt bleibt. Des Weiteren ist die sekundäre Hörrinde afferent mit dem Gyrus angularis verbunden. Ihm wird eine zentrale Rolle bei der Verknüpfung von Gesehenem und der Sprache zugeordnet, was für die Prozesse des Lesens und Schreibens entscheidend ist. Der Gyrus angularis erhält seine Informationen aus dem sekundären visuellen Kortex und decodiert das Gesehene. Die erkannten Impulse werden dann an die sekundäre Hörrinde gesandt und dort mit dem durch erinnertes Hören entstandenen Sprachverständnis verknüpft (vgl. Trepel, 1999). Probst et al. (2004) charakterisieren die primäre Hörrinde zusammenfassend als *akustisches Wahrnehmungsfeld* und dem entgegengesetzt die sekundäre Hörrinde als *akustisches Erinnerungsfeld*. Da bei Gehörlosen das Sprachverständnis aus den oben bereits beschriebenen Gründen verändert bzw. anders ausgeprägt wird, laufen vermutlich auch Bild- oder Schrifterkennungs- und Verarbeitungsprozesse im Vergleich zu Hörenden unterschiedlich ab, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

8.2 Veränderungen durch Deprivation oder stärkere Beanspruchung

Es ist seit langem bekannt, dass die Entwicklung des Gehirns unter anderem von Umwelteinflüssen abhängig ist und von ihnen geprägt wird. Der Satz „form follows function“ charakterisiert diesen Zusammenhang treffend (vgl. Karnath & Thier, 2003). Ändern sich die besagten Umwelteinflüsse, verändert sich folglich auch das Gehirn in

Struktur und Funktion. Zu solchen Veränderungen führen z. B. intensive Lern- oder Trainingsprozesse wie das tägliche Üben am Klavier (vgl. Karnath & Thier, 2003). Die Steigerung der Häufigkeit und Intensität von kognitivem, sensorischem oder motorischem Input ruft in den meisten Fällen plastische Veränderungen in den Assoziationskortex hervor. Plastizität bezeichnet die „(...) Veränderbarkeit sowohl der anatomischen als auch der funktionellen Organisation des zentralen Nervensystems (...)“ (Fahle, S. 662, 2003, In: Karnath & Thier, 2003). Unter dem Begriff *plastische Veränderungen* wird allerdings nicht die Fähigkeit zu Veränderungen verstanden, sondern die bereits stattgefundenen Veränderungen. In diesem Fall kann man auch von *funktioneller Reorganisation* sprechen. Plastische Veränderungen führen zu einer Anpassung an neue, modifizierte Anforderungen und Umgebungsbedingungen (z. B. das Klavierspielen zu beherrschen).

Deprivation kann sowohl zu der bereits zitierten plastischen Veränderung (z. B. erhöhte Neuronendichte), als auch zu kortikaler Reorganisation führen. Während *Plastizität* als Fähigkeit der Strukturen zu Veränderung verstanden wird, bezeichnet man die Veränderungen und Neuorganisationen der Größe und Lage der Repräsentationen auf den somatosensorischen Arealen (primäre und sekundäre Areale) im Großhirn als *kortikale Reorganisation* (vgl. Flor, 2002). Diese beiden Prozesse werden in der Literatur häufig als Synonyme gebraucht und sind begrifflich nicht scharf voneinander trennbar, sondern miteinander verknüpft. Aufgrund von veränderungsinduzierenden Prozessen, wie z. B. Verletzungen, Deafferenzierung oder Lernen, kommt es zu einer Neuorganisation im Gehirn, der kortikalen Reorganisation, die auf den Prinzipien der Plastizität beruht.

Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh und Taub (1995) konnten nachweisen, dass es bei Berufsgeigern aufgrund taktiler Stimulation der linken Fingerkuppen (hier: häufiges Berühren der Saiten aufgrund intensiven Übens) zu plastischen Veränderungen kommt. Die untersuchten Personen zeigten im Verhältnis zu Kontrollpersonen eine Vergrößerung der Repräsentation der Finger der linken Hand im somatosensorischen Kortex. Das kortikale Repräsentationsfeld der Finger im Gehirn vergrößerte sich, je früher mit dem Geigenspielen angefangen wurde (vgl. Elbert et al., 1995).

8.2.1 Plastische Veränderungen und Aktivitätsveränderungen als Folge von Kompensationsvorgängen

Zwei, hierfür entscheidende Vorgänge, können zur sensorischen Deprivation (hier: Entzug von visuellen Stimuli) eines Hirnareals und in deren Folge ebenfalls zu plastischen

Veränderungen im betroffenen Areal führen: zum einen *fehlender Input*, das sogenannte *dark rearing*, was z. B. bei Tieren experimentell durch Leben in völliger Dunkelheit hervorgerufen wird und durch eine Verarmung der sensorischen Stimulation gekennzeichnet ist. Der andere Vorgang, der zu plastischen Veränderungen führt, ist *kein Input* zum verarbeitenden Hirnareal. Die Ursache sind häufig traumatische Ereignisse. Bei Gehörlosen kann durch mechanische Einwirkungen (z. B. Stürze) der Nervus vestibulocochlearis (VIII. Hirnnerv) verletzt werden. Damit ist die Weiterleitung der Informationen von den Sinneszellen zum Gehirn unterbrochen, was einer *Deafferenzierung* entspricht. Die auditiven Areale zur Lautverarbeitung und -perzeption sind zwar bezüglich auditiver Stimuli depriviert, aber dennoch fähig, Stimuli anderer Modalitäten zu verarbeiten.

Es ist bekannt, dass es bei unimodaler Deprivation (Deprivation einer sensorischen Modalität), wie es bei Gehörlosen und Blinden der Fall ist, zu einer gesteigerten Verarbeitung des sensorischen Inputs in den verbleibenden, multimodalen Hirnarealen kommt. Die Ursache könnte in einer erhöhten Neuronendichte in den nicht-deprivierten Arealen als Reaktion auf die Deprivation in einem sensorischen Areal liegen. Eine solche kompensatorische Ausdehnung der verbleibenden Modalitäten konnten Loke & Song (1991), Rettenbach, Diller und Sireteanu (1999) und Bavelier et al. (2000) bei Gehörlosen nachweisen. Ihre Studien bewiesen eine erweiterte visuelle Aufmerksamkeit, speziell im peripheren visuellen Feld bei Gehörlosen. Die Versuchsgruppe mit Verlust der Hörfähigkeit verarbeitete Ereignisse im peripheren visuellen Feld genauer als Hörende (vgl. Loke & Song, 1991; Rettenbach et al., 1999; Bavelier et al., 2000). Bei Gehörlosen stieg die Anzahl der Aktionspotentiale, die auf visuelle Reize (hier: im peripheren Sehfeld) in multimodalen Arealen ausgelöst wurden, was die Autoren mit einer verstärkten Aktivität der Neurone begründeten (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Die Vermittlung solcher Verhaltenskompensationen erfolgt aufgrund einer verstärkten Rekrutierung von multimodalen Arealen des Kortex durch die verbleibenden Modalitäten. Rauschecker, Tian, Korte und Egert (1992) fanden bei Ratten, die nach visueller Deafferenzierung eine erhöhte Neuronendichte im auditiven Kortex aufwiesen, eine Erklärung für dieses Phänomen: die beschriebene Hypertrophie der Strukturen im primären auditiven Kortexareal wird durch eine stärkere „Hinwendung“ zu den verbleibenden sensorischen Modalitäten nach Deprivation vermittelt (vgl. Rauschecker et al., 1992). Nach Volgyi, Farkas und Toldi (1993) sind bei Ratten solche kompensatorischen Effekte stärker, wenn die Deprivation früh im Leben des betroffenen Tieres eintritt. Lange Zeit glaubte man, dass

es bei Menschen eine kritische Phase gibt, in der plastische Veränderungen (hier: in primären sensorischen Kortexarealen) möglich sind, und dass diese Fähigkeit mit dem Alter verloren geht. Zahlreiche Studien und Befunde haben diese Annahme widerlegt und aufgezeigt, dass sich auch die Strukturen eines erwachsenen Gehirns, wenn auch nicht in gleichem Umfang wie die eines Kleinkindes, verändern und anpassen können (vgl. Karnath & Thier, 2003).

Bavelier & Neville (2002) zufolge führen die kompensatorischen Veränderungen zwar deutlich zu Unterschieden in der Durchführung komplexer Aufgaben, sie stellen aber in Frage, ob diese Veränderungen durch die Gehörlosigkeit an sich hervorgerufen werden. Ihrer Meinung nach führen die Veränderungen, entgegen der Ansicht von Loke & Song (1991), Rettenbach et al. (1999) und Bavelier et al. (2000), nur selten zu absoluten Empfindlichkeitsveränderungen. Diese Ergebnisse implizieren, dass kompensatorische Veränderungen nicht über den gesamten Kortex ausgebreitet auftreten, sondern spezifisch im betroffenen System (vgl. Bavelier & Neville, 2002).

Die umrissenen Veränderungen bzw. Neuorganisationen finden auf drei Ebenen statt, die miteinander verknüpft sind: neuronale Ebene, kortikale Ebene und Verhaltensebene. Auf diesen Ebenen kommt es zu einer Umverteilung von Aktivitäten in intakte Regionen des entsprechenden deprivierten Systems. Die Aktivitätsänderungen können in:

- direkter Umgebung
- anatomisch verbundenen, entfernteren Arealen
- homotopen Arealen der anderen Hemisphäre

auftreten (vgl. Karnath & Thier, 2003). Die Veränderungen der Aktivitäten in direkter Umgebung sind in den letzten Abschnitten dargelegt worden. Eine Studie von Giraud, Price, Graham und Frackowiak (2001) belegte, dass diese plastischen Veränderungen relativ stabil blieben, auch wenn die deprivierte Modalität wiederhergestellt wurde (hier: Erhalt eines Cochlea-Implantates = CI). Durch den Verlust der Hörfähigkeit bei postlingualen Gehörlosen zeigte sich eine erhöhte Neuronendichte in den Feldern der visuellen Perzeption. Nach Erhalt des CI wurden Aktivitäten in V1 und V2 (= primärer und sekundärer visueller Kortex) während auditiver Sprachverarbeitung registriert. Das bedeutet, dass der visuelle Kortex bei der Perzeption von auditiven Reizen rekrutiert wurde. Die verstärkte Hinwendung zum visuellen Kortex zur Kompensation des Ausfalls der auditiven Felder blieb auch nach Wiederherstellung der deprivierten Modalität bestehen. Allerdings stellten Giraud et al. (2001) in Frage, ob ihre Ergebnisse eine Plastizität durch die Gehörlosigkeit an sich widerspiegeln, oder ob die Effekte eher der

Hinwendung der CI-Träger zu visuellen Hinweisreizen während der Tests zuzuschreiben waren.

8.2.2 Cross-modale Reorganisationsprozesse

Der Eintritt einer auditiven Deprivation kann in der Folge zu deutlichen Reorganisationsprozessen und plastischen Veränderungen in entfernteren Arealen führen. Finney et al. (2001) boten sechs Gehörlosen und sechs Hörenden während einer fMRT-Untersuchung bewegte Punktmuster dar. Sie fanden signifikante Unterschiede in der Aktivierung des auditiven Kortex zwischen beiden Gruppen. Die Gehörlosen zeigten eine signifikante Aktivität im rechten auditiven Kortex. Damit wiesen die Autoren nach, dass bei kongenitalen Gehörlosen der eigentlich deprivierte auditive Kortex bei der Darbietung von visuellen Stimuli aktiviert wird (vgl. Finney, 2001). Finney et al. (2001) bewiesen neben zahlreichen anderen Studien, dass das primäre auditive Verarbeitungsareal bei Verlust dieser Sinnesmodalität für die Verarbeitung von Informationen anderer Modalitäten genutzt werden kann. Diese Übernahme des auditiven Kortex für die Verarbeitung von Bildern wird als *cross-modale Plastizität* bezeichnet. Ein Teil der deprivierten Region, der typischerweise auf akustische Reize antwortet, wie es bei Hörenden der Fall ist, wird im weiteren Verlauf der Entwicklung für die Verarbeitung von visuellen Stimuli rekrutiert (vgl. Bavelier & Neville, 2002).

8.3 Mechanismen der cross-modalen Plastizität

Im Folgenden wird kurz umrissen, welche Mechanismen zu Reorganisationsprozessen und cross-modaler Plastizität führen und über welche neuronalen Substrate solche Veränderungen vermittelt werden. Die unterschiedlichen Typen von sensorischer Deprivation sowie veränderte Umgebungsbedingungen führen zu unterschiedlichen Ausprägungen plastischer Veränderungen (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Bisherige Tierstudien zeichnen zwei mögliche Mechanismen als Grundlage der Reorganisation ab: zum einen kann Reorganisation eine Folge von *Änderungen in lokalen Verknüpfungen* innerhalb eines Areals sein. Zum anderen kann sie aus der *Stabilisierung von normalerweise flüchtigen Verknüpfungen* zwischen zwei Arealen resultieren (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Im

Folgenden werden die Mechanismen auf den Systemleveln erklärt, welche die plastischen Veränderungen vermitteln.

A Changes in local connectivity

Die Grundlage dieser intra-modalen plastischen Veränderungen sind lokale Mechanismen, wie z. B. lokales Sprießen oder die Freilegung von stillgelegten Synapsen (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Bei niederen Vertebraten kommt es beim Vorgang des *local sprouting* aufgrund eines degenerierten Axons zur Entwicklung von Fortsätzen an benachbarten Axonen, die dann synaptische Kontakte am degenerierten Axon bilden (vgl. Pinel, 2001). Diese Form der Plastizität ist nicht auf den sich entwickelnden Organismus beschränkt, sondern wurde auch bei Erwachsenen beobachtet (vgl. Bavelier & Neville, 2002).

B Changes in subcortical connectivity

Plastische Veränderungen können ebenfalls durch die Reorganisation von langfristigen, subcorticalen Verknüpfungen vermittelt werden und finden auf der Ebene des Thalamus oder Hirnstammes statt. Der zugrunde liegende Mechanismus basiert vermutlich auf der Stabilisierung von normalerweise redundanten und flüchtigen Nervenbahnen für eine benötigte Funktion. Diese Form der Plastizität scheint sich auf den in der Entwicklung befindenden Organismus zu beschränken, da vermutlich nur „unreife Strukturen“ unter evolutionärem Druck zum Funktionswechsel gezwungen werden können (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Bei kongenital blinden Ratten konnte nachgewiesen werden, dass der nicht-degenerierte Teil des okzipitalen Kortex aufgrund aktivitätsbezogener Konkurrenz durch auditive Stimuli rekrutiert wurde (vgl. Doron & Wollberg, 1994). Solche Beobachtungen unterstützen die Annahme, dass ähnliche Prozesse bei Gehörlosen stattfinden.

C Changes in cortico-cortical feedback

Neuere Studien vertreten die Annahme, dass die Verbesserung des kortiko-kortikalen Feedbacks, speziell vom parietalen Kortex, eine weitere Ursache für cross-modale Reorganisation bei Gehörlosen sein kann (vgl. Bavelier et al., 2000). Bei Gehörlosen konnte eine verbesserte, funktionelle Verbindung zwischen dem parietalen Kortex und frühen, visuellen Arealen nachgewiesen werden, wenn sie sich auf das periphere visuelle Gesichtsfeld konzentrierten. Diese Form beruht auf dem Feedback zwischen den genannten Arealen und der Verarbeitung rückläufiger Informationen. Die Stärke der Verbindungen, die durch ein solches Feedback entstehen, ist abhängig von Erfahrungen

und wird durch sensorischen Input modelliert. Feedback-Verbindungen sind wichtig für die Formung der funktionellen Charakteristik der Areale, die miteinander in Verbindung stehen (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Macaluso, Frith und Driver (2000) wiesen eine verbesserte Rekrutierung der Region für visuelle Objekterkennung nach, wenn die Hand taktil stimuliert wurde, während zeitgleich auf der stimulierten Seite visuelle Stimuli dargeboten wurden. Die Verbesserung einer sensorischen Fähigkeit (hier: Objekterkennung) wird nach Meinung der Autoren durch Rückprojektion von multimodalen Arealen, wie z. B. dem parietalen oder visuellen Kortex, vermittelt (vgl. Macaluso et al., 2000).

D Changes in long-range cortico-cortical connectivity

Ein bisher hypothetisch angenommener Mechanismus, welcher inter-modale plastische Veränderungen vermittelt, beruht auf der Vermutung, dass langfristige kortiko-kortikale Verbindungen zwischen sensorischen Modalitäten stabilisiert werden. An Primaten konnte eine Bahnung zwischen dem primären, auditiven Kortex (A1) und einem dem Teil des primären, visuellen Kortex für das periphere Sehen (V1) nachgewiesen werden (vgl. Falchier, 2001). Die Abwesenheit von Geräuschen bei Gehörlosen führt wahrscheinlich zu einer Abschwächung bzw. Degeneration dieser Bahnung zwischen auditiven und visuellen Projektionen, die peripheres Sehen vermitteln. Möglicherweise erlauben diese fehlenden Projektionen eine Verbesserung der visuellen Fähigkeiten mittels einer effektiveren Rekrutierung des V1 durch visuellen Input. Vermutungen der Autoren zufolge wird zur verbesserten peripheren visuellen Aufmerksamkeit, welche bei Gehörlosen zu beobachten ist, während des Prozesses ein neurales Substrat bereitgestellt (vgl. Röder, Stock, Rösler, Bien & Neville, 2001). Die Existenz einer direkten Verbindung zwischen A1 und V1 könnte zahlreiche cross-modale Effekte erklären, die bisher als Veränderungen durch Rückprojektionen von multimodalen Arealen interpretiert wurden (vgl. Macaluso et al., 2000).

9 Hypothesen des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior

Wie im eben dargestellten Theorieteil zum primären auditiven Kortex mehrfach dargestellt, ist zahlreichen Forschergruppen der Nachweis gelungen, dass die primären auditiven und visuellen Felder kortikalen Reorganisationsprozessen unterliegen (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Für die vorliegende Studie ist vordergründig von Interesse, was mit dem deprivierten auditiven Kortex bei Gehörlosen im Laufe der Zeit geschieht. Finney et al. (2001) sowie Bavelier & Neville (2002) gelang der Nachweis, dass der Verlust der auditiven Sinnesmodalität bei Gehörlosen zu einer Verarbeitung von Informationen anderer Modalitäten in dem deprivierten Areal führt. In Falle der Gehörlosen wird der auditive Kortex hauptsächlich für die Verarbeitung visueller Stimuli benutzt. Diese Übernahme des auditiven Kortex für die Verarbeitung von Bildern wird als *cross-modale Plastizität* (siehe Abschnitt 8.2.2) bezeichnet.

Aus den Ergebnissen der Literatur heraus wird vermutet, dass die hier untersuchten Gehörlosen ebenfalls Aktivierungen im primären auditiven Kortex auf die dargebotenen Bilder zeigen. Da das Fixationskreuz als Baseline visuell gering anspruchsvoll gegenüber den dargebotenen, komplexen Kategoriebildern ist, werden Aktivierungen auf die Bedingungen im Vergleich zur Baseline erwartet.

Da die drei hörenden Gruppen während der gesamten Dauer den starken Geräuschen des Scanners ausgesetzt sind, müssten sich die Aktivierungen im A1 während der Baseline mit denen während der Darbietung der einzelnen Bilder herausmitteln (auditive Eindrücke bleiben während der Gesamtdauer des Experimentes gleich). Folgende gerichtete Hypothese wird deswegen postuliert:

Hypothese 9: Die Gruppe der Gehörlosen weist im Gegensatz zu den drei hörenden Gruppen Aktivierungen im primären auditiven Kortex auf die dargebotenen Bilder auf.

Die Ergebnisse des sekundären auditiven Kortex werden im Zusammenhang mitgenannt und diskutiert, da diese beiden Strukturen eng miteinander verbunden sind. Hypothesen für den A2 (Wernicke-Areal) wurden jedoch bereits in Abschnitt 4.1 formuliert.

10 Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach Hirnregion, Gruppenpaaren und Prädiktoren (Bedingungen) geordnet aufgezeigt. Die Darstellung der Haupteffekte zwischen den Gruppen, Prädiktoren oder Hemisphären erfolgt in sogenannten *Talairach-Tabellen* (siehe Tabelle 10.1), in denen alle notwendigen Informationen zu den eruierten Aktivierungen zu finden sind.

Tabelle 10.1: Erläuterungen zu einer Talairach-Tabelle zur Verdeutlichung der Aktivierungen

Aktivierungen im dargestellten **Hirnareal** nach Brodmann (= BA)

dargestellte **Gruppe**:
GL = Gehörlose
K1 = hörende Kontrollgruppe 1
D = Gebärdensprachdolmetscher
K2 = hörende Kontrollgruppe 2

Gruppe 1 **größer** als Gruppe 2
 (Aktivierungen der Gruppe 2 werden von denen der Gruppe 1 abgezogen => Folge: die „Mehrpaktivität“ der Gruppe 1 ist zu sehen)

Bedingung	Lateralität	GL BA 42,22		K1 BA 42,22		GL > K1 BA 42,22		K1 > GL BA 42,22	
		TAL	T-value/ p-value NrofVo	TAL	T-value/ p-value NrofVo	TAL	T-value/ p-value NrofVo	TAL	T-value/ p-value NrofVo
Wort	R	61 -31 11	5,67 / 0,00031 9			58 -27 13	4,62 / 0,00019 4		
	L			-56 -51 11	7,52 / 0,00002 27				
Pfeil	R								
	L	-69 -27 5	5,35 / 0,00046 17	-53 -48 11	5,38 / 0,00031 5	-69 -21 8	5,32 / 0,000039 16		
Gesten	R			43 -21 -7	5,5 / 0,00026 7				
	L			-62 -36 17	7,03 / 0,000036 31				
Statisch	R	42 -18 -1	7,91 / 0,000024 14			49 -9 -1	6,26 / 0,000005 71		
	L	-50 -33 2	7,42 / 0,00004 24	-53 -42 5	4,91 / 0,00062 5	-65 -18 11	5,86 / 0,000012 59		
Sinnlos	R	61 -29 14	6,05 / 0,00019 7			61 -18 11	5,11 / 0,000063 37		
	L	-62 -24 12	6,00 / 0,0002 28			-62 -21 12	6,41 / 0,000004 27		
Objekt	R	61 -31 11	7,25 / 0,000048 14			58 -8 5	4,85 / 0,00011 25		
	L					-65 -6 2	3,88 / 0,001 4		

Bedingung

Lateralität der aktiven Voxel (**Hirnhälfte**)
R = rechts
L = links

Talairachkoordinaten
 (Koordinaten **x, y** und **z** des signifikanten Schwerpunktes der Aktivierung)

t-Wert: „4,85“
p-Wert: „0,00011“
Voxelanzahl in 3x3x3 mm³-großen Voxeln: „25“

10.1 Allgemeines zur Auswertung der fMRT-Daten des Bilder-Paradigmas

Zum besseren Verständnis soll im Folgenden noch einmal die wichtigsten Punkte zur Auswertung der Daten dargestellt werden. Die Ergebnisse werden nach verschiedenen Kriterien getrennt dargestellt. Je nach Fragestellung können die Daten zum einen nach Gruppen unterteilt aufgezeigt werden, zum anderen findet eine Ergebnisdarstellung nach Bedingungen und Hirnregionen (Brodmann-Arealen) statt. Aufgrund der statistischen Notwendigkeit einer Altersparallelisierung zwischen der Versuchs- und Kontrollgruppe wurden zwei Gruppenpaare gebildet, zwischen denen die dargestellten Vergleiche angestellt wurden:

1. Gruppenpaar: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)
2. Gruppenpaar: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Die Methode der gebildeten Gruppenpaare dient der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, um z. B. Effekte aufgrund von Altersunterschieden auszuschließen. Den Experimentalgruppen GL und D wurde je eine altersparallelisierte Kontrollgruppe (K1 und K2) gegenübergestellt.

Für alle Vergleiche wurde ein unkorrigierter Wert auf einem Signifikanzniveau von $p < 0.005$ festgelegt. Dieser galt für alle *regions of interest* (= ROI)-Fragestellungen. Das etwas liberaler gewählte p-Niveau von $p < 0.005$ (= α -Fehler) diente der deutlichen Hervorhebung von Haupteffekten. Aufgrund differenter Hirnanatomien zwischen allen Subjekten und Berechnung der Gruppenanalysen mit unterschiedlicher Gruppenstärke wäre ein konservativeres p-Niveau zu Lasten signifikanter Aktivierungsunterschiede gegangen. Der festgelegte, höhere α -Fehler (H_0 wird verworfen, obwohl sie richtig ist) geht zu Gunsten eines minimierten β -Fehlers, um das Risiko, einen gefundenen Unterschied in den Aktivierungen zu verwerfen (H_1 wird verworfen, obwohl sie richtig ist) zu verringern. Die Aufnahme im fMRT erfolgte mit $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ -Voxeln, und diese wurden im Zuge der Auswertung mit Brain Voyager® auf $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ -Voxel interpoliert. Alle Ergebnisse sind mit Voxeln von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ Größe dargestellt. Es gilt ein *cut off* von drei zusammenhängenden Voxeln (entspricht einer *cut off*-Schwelle von $81 \text{ } 1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ Voxeln). Alle Ergebnisse beziehen sich auf positive Aktivierungen. Die Negativierungen gehen in die Berechnungen mit ein, sind aber nicht sichtbar. Aus diesem Grund werden alle Gruppenvergleiche in beiden Richtungen dargestellt ($a > b$ und $b > a$). Alle

Berechnungen für das Bilder-Paradigma erfolgten mittels *random effects*. Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen des primären und sekundären auditiven Kortex befinden sich in Anhang M auf der beigelegten CD.

10.2 Gyri temporales transversi und Gyrus temporalis superior

1. Vergleich: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Die Tabelle 10.2 verdeutlicht die signifikanten Aktivierungen im primären auditiven Kortex. Tabelle 10.3 zeigt die Aktivierungen im sekundären auditiven Kortex. Verglichen werden die Gruppen Gehörlose (GL) und die Kontrollgruppe 1 (K1) gegen die Baseline sowie gegeneinander. Die Aktivierungen während der Präsentation des Fixationskreuzes dienen als Baseline. In der Darstellung sind die Aktivierungen bezüglich aller sechs Stimuluskategorien zu sehen.

Tabelle 10.2: Aktivierungen in den Gyri temporales transversi (= primärer auditiver Kortex) für die Vergleiche Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose

Bedingung Lateralität	GL BA 41		K1 BA 41		GL > K1 BA 41		K1 > GL BA 41	
	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value
Wort R								
L								
Pfeil R								
L								
Gesten R								
L								
Statisch R	44 -27 5	5,3 / 5 0,0005			55 -24 11	6,34 / 17 0,000004		
L					-58 -19 8	4,56 / 8 0,0002		
Sinnlos R					52 -25 11	5,07 / 23 0,0000068		
L					-59 -21 12	5,38 / 18 0,0000034		
Objekt R								
L								

Anmerkung^a: $p < 0,005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Bezüglich der in Kapitel 9 formulierten Hypothese 9 können die erwarteten Aktivierungen im A1 für die Gruppe der Gehörlosen in zwei Kategorien bestätigt werden.

Tabelle 10.3: Aktivierungen im Gyrus temporalis superior (= sekundärer auditiver Kortex) für die Vergleiche Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose

Bedingung	Lateralität	GL BA 42, 22				K1 BA 42, 22				GL > K1 BA 42, 22				K1 > GL BA 42, 22			
		TAL			T-value / NrofVo p-value	TAL			T-value / NrofVo p-value	TAL			T-value / NrofVo p-value	TAL			T-value / NrofVo p-value
Wort	R	61	-31	10	5,93 / 12 0.00022												
	L					-57	-52	10	7,52 / 26 0.00002								
Pfeil	R																
	L	-54	-52	9	6,36 / 14 0.00013	-54	-49	10	5,38 / 5 0.00031	-69	-21	8	5,32 / 16 0.000039				
Gesten	R					42	-22	-7	5,50 / 9 0.00026								
	L					-63	-37	17	7,03 / 33 0.000036								
Statisch	R	45	-19	-1	7,91 / 15 0.000024					49	-9	-1	9,23 / 71 0.000005				
	L	-51	-34	2	7,42 / 82 0.00004	-54	-43	4	4,91 / 5 0.00062	-65	-18	11	5,86 / 59 0.000012				
Sinnlos	R	61	-29	13	6,22 / 8 0.00016					61	-18	11	5,11 / 37 0.000063				
	L	-51	-35	4	6,08 / 23 0.00019					-62	-21	12	6,41 / 27 0.000004				
Objekt	R	61	-31	10	7,28 / 14 0.000047					58	-8	5	4,85 / 25 0.00011				
	L									-65	-6	2	3,88 / 4 0.001				

Anmerkung^a: $p < 0.005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Zur Veranschaulichung der Daten dienen die Abbildungen 10.1 und 10.2. Die Abbildung 10.1 zeigt beispielhaft die höhere Aktivierung der Gehörlosen im primären auditiven Kortex durch visuelle Stimuli (hier: Kategorie „sinnlos“; GL > K1). In der Abbildung 10.2 wird die Aktivierung der Gehörlosen > Kontrollgruppe 1 für die Kategorie „statisch“ im sekundären auditiven Kortex präsentiert. Dargestellt sind die funktionellen Veränderungen im anatomischen Scan über alle Versuchspersonen beider Gruppen. Die *Regions of interest* (ROI, hier primärer auditiver Kortex und sekundärer Kortex) wurden bei der Antwort auf die dargebotenen Bilder für Gehörlose versus Hörende unterschiedlich aktiviert (die Farben sind in der Skala rechts definiert). Die Aktivierungen sind im transversalen (links), sagittalen (Mitte) und coronalen (rechts) Schnitt des gemittelten anatomischen Gehirnes gezeigt. Alle Daten wurden in den standardisierten „stereotaxis space“ von Talairach und Tournoux (vgl. Talairach & Tournoux, 1988) transformiert. Die Areale der visuellen Ansprechbarkeit fallen in die rechten und linken Brodmann-Areale 22, 41 und 42, die vorher als Regions of interest definiert wurden. Das Fadenkreuz hebt die Voxel innerhalb des Areals mit dem Haupteffekt hervor (signifikanter Schwerpunkt aller aktiven Voxel). Die Farbskala ist ein Indikator für den funktionellen Intensitätswert (FIT) oder auch das Ausmaß der Aktivierung.

Zur Darstellung der Aktivierungen werden neuroradiologische Konventionen in der transversalen und coronalen Schnittebene verwendet, was bedeutet, dass die Hirnstrukturen der linken Hemisphäre rechts und die der rechten Hemisphäre links im Bild dargestellt sind.

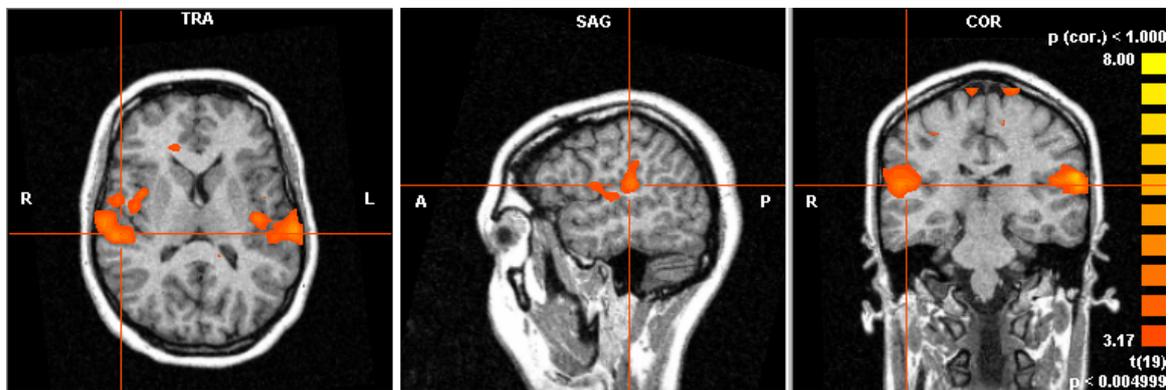


Abbildung 10.1: Aktivierungsmuster für den Vergleich Gehörlose > Kontrollgruppe 1 in den Gyri temporales transversi (= A1) für die Bedingung *sinnlos*.

Anmerkung^a: Schnittebenen v.l.n.r.: transversal, sagittal, coronal

Anmerkung^b: Ansichten des Gehirnes: L = links, R = rechts, A = anterior, P = posterior

Anmerkung^c: Das Fadenkreuz bezieht sich auf die rechte Hemisphäre (bezüglich sagittaler Ansicht).

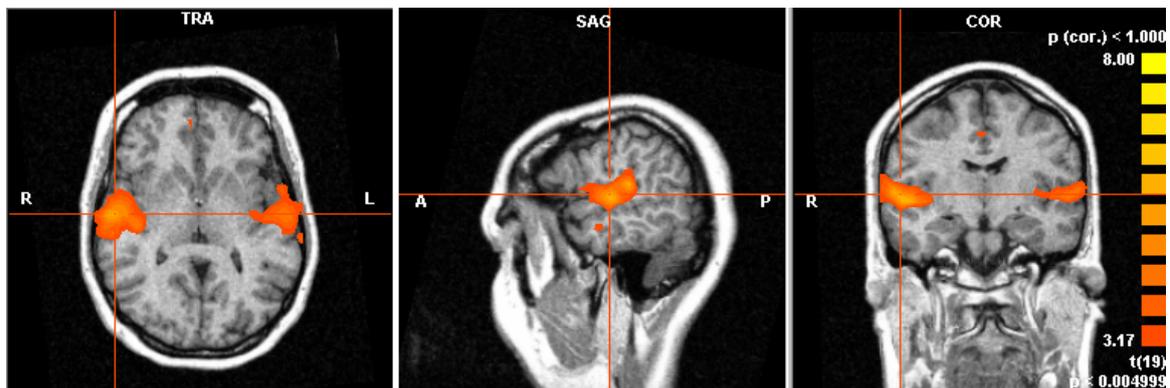


Abbildung 10.2: Aktivierungsmuster für den Vergleich Gehörlose > Kontrollgruppe 1 im Gyrus temporalis superior (=A2) für die Bedingung *statisch*.

Anmerkung^a: Schnittebenen v.l.n.r.: transversal, sagittal, coronal

Anmerkung^b: Ansichten des Gehirnes: L = links, R = rechts, A = anterior, P = posterior

Anmerkung^c: Das Fadenkreuz bezieht sich auf die rechte Hemisphäre (bezüglich sagittaler Ansicht).

2. Vergleich: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

In Tabelle 10.4 sind die analogen Aktivierungen im sekundären auditiven Kortex für die Gruppen Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 2 zu sehen. Die Tabelle veranschaulicht die signifikanten Aktivierungen für alle sechs Kategorien (Baseline: Fixationskreuz) im sekundären Kortex. Da beide Gruppen in den Gyri temporales transversi (= primärer auditiver Kortex) für die in der Tabelle 10.2 dargestellten vier Vergleiche keinerlei Aktivierungen zeigten, wurde keine Tabelle dargestellt.

Tabelle 10.4: Aktivierungen im Gyrus temporalis superior (= sekundärer auditiver Kortex) für die Vergleiche Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher > Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 2 > Dolmetscher

Bedingung	Lateralität	D BA 42, 22			K2 BA 42, 22			D > K2 BA 42, 22			K2 > D BA 42, 22		
		TAL	T-value / NrofVo	p-value	TAL	T-value / NrofVo	p-value	TAL	T-value / NrofVo	p-value	TAL	T-value / NrofVo	p-value
Wort	R	51 11 -5	6,53 / 3										
	L	-54 -45 2	13,65 / 36										
Pfeil	R		11,38 / 18										
	L	-54 -45 2	0,000009										
Gesten	R		12,14 / 28	48 -35 4	4,97 / 8								
	L	-54 -45 2	0,000006	-60 -52 9	0,000077								
Statisch	R		9,70 / 20										
	L	-54 -45 2	0,000026										
Sinnlos	R		8,29 / 16	57 -46 2	4,77 / 5								
	L	-60 -52 9	0,000073	-66 -46 13	0,001								
Objekt	R		5,08 / 3		5,31 / 4								
	L	-57 -47 2	0,0014	-54 -40 2	0,00049								

Anmerkung^a: $p < 0.005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Im Folgenden werden die dargestellten Ergebnisse im Kontext der gegenwärtigen Literatur diskutiert.

11 Diskussion des Bilder-Paradigmas: Gyri temporales transversi, Gyrus temporalis superior

Zu Beginn des Diskussionsteiles sollen alle Hauptergebnisse bezüglich des primären und sekundären auditiven Kortex kurz umrissen werden. Es fanden sich signifikante Aktivierungen im primären und sekundären auditiven Kortex für die Gruppe der Gehörlosen. Die Gruppen K1, K2 und D zeigten erwartungsgemäß Aktivierungen im A2 (Wernicke-Areal) und keine im A1. Diese drei Gruppen wiesen außerdem eine deutliche Linksdominanz in den Aktivierungen auf. Dagegen zeigte sich für die gehörlosen Versuchspersonen ein bilaterales Aktivierungsmuster bei der Verarbeitung von visuellen Stimuli. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Kontext der relevanten Literatur diskutiert.

Zahlreiche Untersuchungen bewiesen Veränderungen in der visuellen Wahrnehmungsleistung als Folge von gewandelten sensorischen Erfahrungen gegenüber Hörenden (vgl. Bosworth & Dobkins, 2002). Außerdem konnten plastische Veränderungen in Bezug auf den visuellen und auditiven Kortex sowie deren Assoziationsfelder nachgewiesen werden (vgl. Bavelier & Neville, 2002). Eine der Hauptuntersuchungen zu dieser Thematik führten Finney et al. (2001) durch und zeigten, dass „(...) *visual stimuli activate auditory cortex in the deaf*(...)“ (Finney et al., 2001). Ihre zentralen Thesen zielten auf die Rekrutierung des deprivierten, auditiven Kortex durch die visuellen Felder, sowie auf stattgefundene Prozesse der funktionellen Reorganisation bei Gehörlosen ab (vgl. Finney et al., 2001). Welche Veränderungen mit dem Fehlen der auditiven Eindrücke einhergehen, und wie und in welchem Ausmaß sich die genannte funktionelle Reorganisation bei auditiv Deprivierten manifestiert, war einer der zentralen Aspekte dieser Untersuchung. Es fanden sich Aktivierungen im primären und sekundären auditiven Kortex auf visuelle Stimuli bei der Gruppe der Gehörlosen, welche die Feststellungen von Finney et al. (2001) bezüglich der Plastizität des auditiven Kortex und des Assoziationsfeldes bestätigen.

Aufgrund der Ergebnisse aus der gegenwärtigen Literatur interessierten bei den konzeptionellen Vorüberlegungen zum Paradigma die Aktivitäten der Gehörlosen im Vergleich zur hörenden Gruppe im primären und in den sekundären auditiven Feldern

während der Darbietung visueller Stimuli. Die anatomisch-physiologischen Abgrenzungen für die Hirnfelder *primärer auditiver Kortex* und *sekundärer auditiver Kortex* wurden dem Talairach Daemon® des Programms Brain Voyager® entnommen (vgl. Talairach & Tournoux, 1988). In den durchgeführten Untersuchungen lautete die Instruktion, die Bilder aufmerksam zu betrachten, den semantischen Inhalt zu erschließen und ihn innerlich zu verbalisieren, ohne dabei die Hände oder die Lippen zu bewegen. Es wurden keine Bilder dargeboten, welche gänzlich ohne Semantik waren (z. B. Punkte); d. h. in jedes Bild konnte ein ausgedachtes Wort hineininterpretiert werden. Für die Gehörlosen waren fünf der sechs möglichen Kategorien von erschließbarem, semantischem Inhalt. Für die hörende Gruppe konnten drei Kategorien („Wörter“, „Gesten“, „Objekte“) korrekt decodiert werden. In die Bilder der jeweils verbleibenden Kategorien wurden, stichprobenartigen Überprüfungen zufolge, von den Probanden freie Wörter assoziiert.

11.1 Aktivierungen im primären auditiven Kortex

In diesen Untersuchungen hier konnte nachgewiesen werden, dass die Gruppe der Gehörlosen im Kontrast zur hörenden Kontrollgruppe 1 ($GL > K1$) in zwei der dargebotenen Kategorien in den Gyri temporales transversi signifikante Aktivierungen aufzeigte (vgl. Tabelle 10.2). Die drei auditiv nicht-deprivierten Gruppen (Kontrollgruppe 1 = K1, Kontrollgruppe 2 = K2; Gebärdensprachdolmetscher = D) zeigten weder im Vergleich gegen Baseline noch im Vergleich zwischen den Gruppen Aktivierungen im primären auditiven Kortex. Dieser Kontrast entsprach den Erwartungen und diente als Kontrollinstanz, da sich die Geräusche während des gesamten Testablaufes nicht änderten und sich somit die Aktivierungen durch das Scannergeräusch während der Baseline „Kreuz“ mit den Aktivierungen während der Darbietung der Bilder herausmittelten.

Die Gesamtaktivität der Gehörlosen in den auditiven Feldern (primärer auditiver Kortex und Assoziationsfelder) lag bei $\sim 8,34 \text{ cm}^3$ (bei einer Voxelgröße von $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$). Etwa 21,35% dieser Aktivierung entfielen dabei auf die Gyri temporales transversi. Diese Zahlen gehen konform mit den Ergebnissen von Finney et al. (2001). In ihrer fMRT-Untersuchung mit sechs Hörenden und sechs Gehörlosen, denen bewegte Punktwolken und ein fixer Punkt dargeboten wurden, zeigte die gehörlose Gruppe Aktivierungen im primären und sekundären auditiven Kortex. Die Gesamtaktivität betrug $\sim 0,95 \text{ cm}^3$. Davon lagen $\sim 0,22 \text{ cm}^3$ im BA 41, was ebenfalls circa 23% entsprach. Die starke Differenz in der

Größe der Aktivierungen zwischen $\sim 8,34 \text{ cm}^3$ (diese Studie) und $\sim 0,95 \text{ cm}^3$ (vgl. Finney et al., 2001) liegt in der Verschiedenheit des Stimulusmaterials begründet (komplexe Bilder mit semantischem Inhalt versus Punktwolken / Punkt). Die Ergebnisse, dass ca. ein Viertel der Gesamtaktivität im primären auditiven Kortex zu finden sind, implizieren, dass das primäre Areal des auditiven Kortex schon bei der Verarbeitung bloßer visueller Stimuli (hier: nicht linguistisch und ohne semantischen Inhalt) rekrutiert wird. Aber auch bei der Verarbeitung von Gebärdensprachbildern bzw. Gesten- oder Objektabbildungen zeigte sich eine deutliche Aktivierung im primären auditiven Kortex durch eigentlich visuelle Reize. Es konnte demnach nachgewiesen werden, dass der auditive Kortex, der bei den Gehörlosen keinen auditiven Input mehr erfährt, der Verarbeitung in der visuellen Modalität „dienen“ kann und somit für die Verarbeitung von Stimuli einer fremden Modalität mitgenutzt wird (vgl. Finney et al., 2001). Das Fehlen einer sensorischen Modalität führt also zu einer neuronalen Reorganisation in den verbleibenden Modalitäten und weist auf stattfindende cross-modale Plastizitätsprozesse hin. In diesem Fall handelt es sich um eine *auditive-zu-visuelle* cross-modale Plastizität. Diese Form von plastischer Veränderung lässt die Fähigkeit des menschlichen Gehirnes zur Reorganisation der Antwort auf visuelle Reize beim frühen Entzug der auditiven Modalität vermuten. Dennoch stellt sich die Frage, warum sich die Aktivierung auf visuelle Stimuli nicht auf A2 (= sekundärer auditiver Kortex = Wernicke) beschränkt, sondern auch in A1 (= primärer auditiver Kortex) zu finden ist. In bisherigen Studien wurde angenommen, dass die primären sensorischen Felder unimodal (hier: ein Areal ist nicht in der Lage, auf Stimuli anderer Modalitäten zu antworten) und starr in ihrer Fähigkeit, auf Veränderungen mit Plastizität zu reagieren, seien. Folglich wurde vermutet, dass cross-modale Plastizität hauptsächlich in den Assoziationskortexen stattfindet. Nishimura et al. (1999) konnten ebenfalls in ihrer Studie, in der Gehörlosen Videos mit Gebärdensprachsequenzen dargeboten wurden, keine Aktivitäten im primären auditiven Kortex nachweisen, was von Seiten der Autoren mit einer starren Organisation und der damit verbundenen „Nicht-Plastizität“ der primären Felder begründet wird. Ihrer Meinung nach ist die primäre Hörrinde ausschließlich für das Hören von Geräuschen zuständig, wogegen die sekundäre Hörrinde in der Lage ist, eine fremde Modalität zu verarbeiten. Die Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den von Finney et al. (2001) und die hier im primären auditiven Kortex gefundenen Aktivierungen. Morrell (1972) und Fishman & Michael (1973) wiesen in diesem Zusammenhang bereits 1973 in ihren Pionierstudien nach, dass cross-modale Plastizität schon sehr früh in der Hierarchie der Hirnareale beobachtet werden kann.

Mittels Mikroelektrodenaufnahmen konnten sie bei nicht-deprivierten Katzen nachweisen, dass ungefähr 30 – 40% der Einheiten in V1 multimodal sind (vgl. Morrell, 1972; Fishman & Michael, 1973). Man könnte daraus schließen, dass die festgestellte visuell-provozierte Aktivität im A1 auch beim menschlichen Gehirn auf Prozesse der umgebungsbedingten Plastizität in primären Hirnarealen zurückführbar ist. Eine weitere Erklärung für die Aktivität in A1 ist eine vermutete direkte Verbindung zwischen A1 und einem Teil von V1 (hier: *long-range connections* zwischen primären Kortizes), welche zunächst bei Primaten gefunden wurde (vgl. Falchier et al., 2001). Die Autoren nehmen an, dass es bei Blinden aufgrund des mangelnden Inputs auf der visuellen Bahn zu einer Verstärkung der A1-V1 Verbindung kommt. Damit erklärten sie die Rekrutierung von V1 während auditiver Prozesse. Bei Gehörlosen könnten ähnliche Prozesse innerhalb der gefundenen A1-V1 Verbindung stattfinden. Diese Verbindung könnte den cross-modalen Effekt der auditiven Aktivierungen in A1 auf visuelle Reize erklären. Auditive Antworten auf visuelles Stimulusmaterial wurden in der Literatur bisher als Veränderungen durch Rückprojektionen von einem multimodalen Areal (= Reorganisation durch Feedback) interpretiert (vgl. Macaluso et al., 2000). Auch Letztgenanntes begründet Aktivierungen in A1 auf visuelle Stimuli. Eine verstärkte A1-V1-Verbindung könnte die Aktivierungen im primären auditiven Kortex dennoch besser erklären, da es zu einer Kompensationsleistung als Folge auf einen Mangel (fehlende auditive Eindrücke) kommt. Zusammenfassend kann man sagen, dass das primäre auditive Feld bei Gehörlosen in die Verarbeitung visueller Stimuli einbezogen wird, wie in der vorliegenden Untersuchung anhand der Aktivierungen in A1 auf Bilder nachgewiesen werden konnte.

11.2 Aktivierungen im sekundären auditiven Kortex

Die Ergebnisse sollen neben der in Kapitel 7.1 geführten Diskussion, dass das Wernicke-Areal (= sekundärer auditiver Kortex) als Sprachareal bei der Verarbeitung von Sprache aktiviert wird, ein zweiter Erklärungsansatz für Ursachen der Aktivierungen in diesem Areal aufgezeigt werden.

In den Tabellen 10.3 und 10.4 sind die Aktivitäten beider Gruppenpaare im sekundären auditiven Kortex zu sehen. Alle vier Gruppen zeigten Aktivierungen im Gyrus temporalis superior. Beim interindividuellen Gruppenvergleich ($GL > K1$; $K1 > GL$; $D > K2$; $K2 > D$) wies allerdings nur der Vergleich $GL > K1$ Aktivierungen auf, was zeigt, dass die Gruppe

der Gehörlosen im Vergleich zu den anderen Gruppen im sekundären auditiven Kortex die höchsten Aktivierungen aufweist. Diese Ergebnisse stimmen mit den vorher aufgestellten Hypothesen überein, da bereits zahlreiche Studien auf diese Art der Aktivierung hinwiesen. In der mehrfach zitierten Studie von Finney et al. (2001) wurden neben den bereits erwähnten Aktivierungen im primären auditiven Kortex die Hauptaktivitäten in den auditiven Assoziationsfeldern bei Gehörlosen gefunden. Allerdings wurden als Stimuli bewegte Punktwolken dargeboten, welche im Gegensatz zu dem hier dargebotenen Stimulusmaterial keinen semantischen Inhalt besaßen. Dieses Ergebnis demonstriert die Rekrutierung des auditiven Kortex bei der Verarbeitung von rein visuellen Stimuli.

In einer Studie von Nishimura et al. (1999) wurden kongenitalen Gehörlosen bewegte Gebärdensprachvideos dargeboten, womit sich das Stimulusmaterial deutlich von den Stimuli von Finney et al. (2001) unterscheidet. In der durchgeführten PET- und MRT-gekoppelten Studie diente eine unbewegte Bildsequenz des Videos als Kontrollbedingung zu den bewegten Gebärdensprachvideos. Nishimura et al. (1999) konnten Aktivierungen in den bilateralen Gyri temporales superiores nachweisen und führten diese auf Prozesse der cross-modalen Plastizität zurück. Den Autoren zufolge wird der superiore Temporallappen zur Verarbeitung von (visualisierter) Gebärdensprache benutzt, da Gehörlose während der Phase der Ausformung neuronaler Netzwerke keinen auditiven Input erfahren. Dieses Phänomen wurde nur bei Gehörlosen beobachtet, da Aktivierungen der ebenfalls getesteten Gebärdensprachdolmetscher beim Sehen von Gebärdensprachvideos nur in visuellen Arealen nachzuweisen waren (vgl. Nishimura et al., 1999).

Die Tatsache, dass es bei der Darbietung verschiedenartiger visueller Stimuli (bewegte Gebärdensprachvideos; statische Gebärdenbilder; bewegte Punktwolken) auch ohne semantische Inhalte zu einer Aktivierung des sekundären auditiven Kortex kommt, weist vermutlich eher auf eine Verbesserung der Diskriminierung von Bildern bei auditiv deprivierten Personen hin, als auf Prozesse des Lesens. Diese Annahme wird durch die A2-Aktivierung bei den Gehörlosen in der Kategorie „Wort“ gegenüber den anderen Kategorien gestützt, da die Kategorie „Wort“ dem eigentlichen Lesevorgang am ehesten entspricht (vgl. Tabelle 10.3). Es kann derzeit nicht gesichert gesagt werden, ob Gehörlose den A2 rekrutieren, um ausschließlich Bilder besser zu diskriminieren, oder ausschließlich, um den Prozess des Lesens zu verbessern. Hierzu müssten andere Untersuchungen durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wäre es z. B. denkbar, alternierend komplexe, visuelle Stimuli mit semantischem Inhalt (Gebärdenbilder) versus einfachen Wörtern und Bildern ohne Semantik (Symbole) darzubieten. Sowohl beim Vorgang der

verbesserten Merkmalsdiskrimination als auch beim besseren Leseprozess handelt es sich aber um cross-modale-Plastizität. Die Resultate der cross-modalen Plastizität in A2 scheinen in diesem Zusammenhang unabhängig von der Art des Stimulusmaterials zu existieren, solange es sich um visuelle Stimuli handelt. Normalerweise auditiv arbeitende Areale werden bei Gehörlosen aufgrund der Tatsache, dass diese für ihre ursprüngliche Funktion (hier: Verarbeitung der auditiven Modalität) depriviert sind, durch visuelle Stimuli aktiviert.

Bei den drei hörenden Gruppen (D, K1, K2) zeigten sich im Vergleich gegen die Baseline erwartungsgemäß ebenfalls Aktivierungen im sekundären auditiven Kortex. Im Gruppenvergleich $D > K2$ und $K2 > D$ mittelten sich die Aktivitäten beider Gruppen in der sekundären Hörrinde heraus. Neben dem in Abschnitt 7.1 beschriebenen Ansatz der semantischen Interpretation von gesehenem Bildern und der daraus folgenden Aktivierungen, wird hier im Kontext zu A1 eine weitere Erklärungsmöglichkeit für die Aktivierungen geboten. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese Ergebnisse ist die Vorstellung von sogenannten „auditiven Bildern“ bei allen hörenden Gruppen. Das bedeutet, dass sich die Probanden das entsprechende gedachte Wort zum Bild auditiv vorstellten, und sich den Klang des Wortes verinnerlichten. Calvert et al. (1997) konnten sogenannte „auditive Bilder“ bei Hörenden nachweisen, die beim stillen Lippenlesen Aktivierungen in den Randregionen des auditiven Kortex zeigten. Dies führten die Autoren auf die tägliche Sprachwahrnehmung und das Hören von Sprachlauten zurück (vgl. Calvert et al., 1997). Die Aktivierungen lassen sich möglicherweise auch auf Prozesse des Lesens zurückführen. Bei diesem Vorgang spielt der A2 (= sekundärer auditiver Kortex) eine zentrale Rolle, da er afferent mit dem Gyrus angularis verbunden ist, der beim Vorgang des Lesens (hier: aus allen Bildern war ein Wort decodierbar oder es wurde ein Begriff hineininterpretiert) eine herausragende Position einnimmt. Die Verknüpfung von Gesehenem und Sprachverständnis beim Lesen setzt allerdings ein „(...) erinnerndes Zuordnen des Gehörten (...)“ (Trepel, 1999, S. 220) voraus. Kongenital Gehörlosen bleiben auditive Eindrücke verwehrt. Umso erstaunlicher ist es, dass beim Sehen von Bildern dennoch auch bei ihnen der A2 aktiviert wurde, obwohl bei Gehörlosen die Verknüpfung zu bereits Gehörtem fehlt. Deswegen werden die Aktivierungen im Gegensatz zu Hörenden auf Prozesse der cross-modalen Plastizität zurückgeführt. Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die hier untersuchten Gehörlosen Aktivierungen in A2 auf visuelle Stimuli verschiedener Charaktere zeigten. Diese lassen sich möglicherweise auf stattgefundene cross-modale Plastizität aufgrund der Deprivation zurückführen.

Obwohl der sekundäre auditive Kortex natürlich bei dem Leseprozess eine bedeutende Rolle einnimmt, sind die signifikanten Aktivierungen der Gehörlosen vermutlich eher ein Beweis funktioneller Reorganisation, um Merkmale besser diskriminieren zu können.

12 Grundlagen des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad

Zur Verarbeitung visueller Reize beschreibt der wichtigste Pfad den Weg von der Netzhaut über das Corpus geniculatum laterale (= CGL) in den primären visuellen Kortex (V1). Von hier aus werden die Informationen in ca. 30 weitere kortikale Areale geleitet. Abbildung 12.1 zeigt das kortikale visuelle System am Beispiel der Makaken, welches von Ungerleider (1995) bei dieser Rhesusaffenart gefunden wurde, und als Modell dient. Inzwischen wurden mittels bildgebender Verfahren potentielle Analoga einiger Teile dieser Areale im menschlichen Gehirn identifiziert (vgl. Ungerleider, 1995).

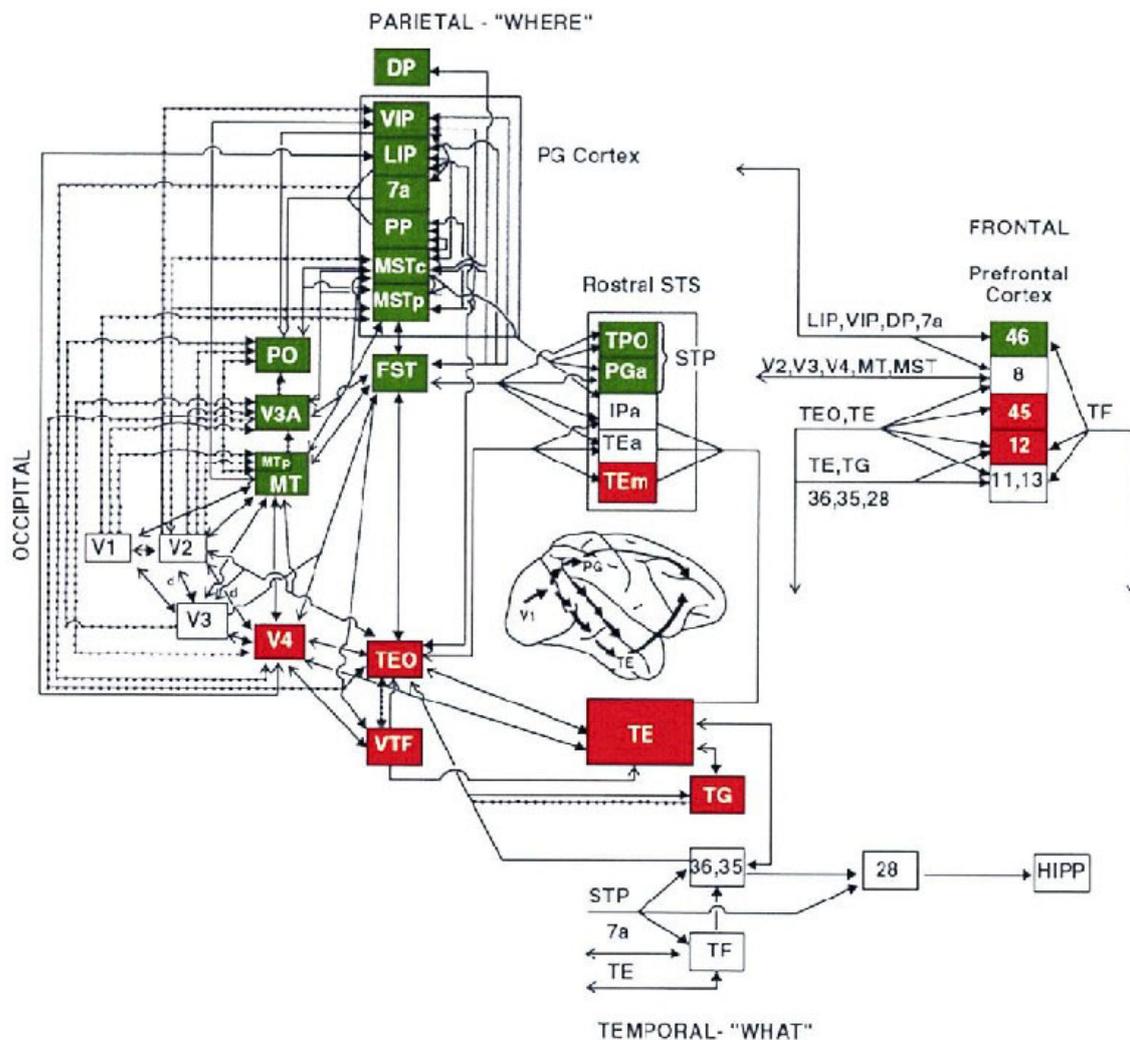


Abbildung 12.1: Kortikales visuelles System des Makaken; die Nomenklatur der Areale ist uneinheitlich (geordnet nach Position im Sehsystem, zytoarchitektonischer Bezeichnung oder anatomischer Lokalisation) (Quelle: Ungerleider, 1995)

12.1 Verarbeitung und Weiterleitung visueller Stimuli in der retinogenikulosträren Bahn zu den kortikalen Projektionsgebieten

Ein komplexes, neuronales Netzwerk ist bereits in der Netzhaut enthalten. Hier beginnt die Weiterleitung von Reizen über das CGL zum primären visuellen Kortex. Auf jeder folgenden Ebene des Systems antworten die Neuronen auf abstraktere Merkmale als die Neuronen der jeweils tieferen Ebene (vgl. Donner, 2003). Die Verarbeitung optischer Reizeigenschaften wird folglich von einer zunehmenden Spezifität der Zelleigenschaften begleitet. Bereits die Retina weist Subgruppen spezieller Ganglienzellen auf ($P\alpha$ -Neurone und $P\beta$ -Neurone). $P\alpha$ -Neurone leiten ihre Informationen an *magnozelluläre* Neurone weiter, welche in den Schichten I und II des CGL liegen. Diese Subgruppe retinaler Ganglienzellen zeichnet sich durch eine hohe zeitliche Auflösung, Kontrastempfindlichkeit und „Farbenblindheit“ aus. $P\beta$ -Zellen dagegen senden ihre Informationen an *parvozelluläre* Neurone, die in den Schichten III bis VI des CGL zu finden sind. Die Zellen dieses Systems sind gekennzeichnet durch ein niedriges zeitliches Auflösungsvermögen und eine hohe Farbempfindlichkeit. Es wird deutlich, dass bereits die Projektionen aus der Retina zu zwei physiologisch und funktional trennbaren Zielneuronen erfolgen. Die Literatur postuliert aus diesem Grund zwei separate visuelle Systeme: den M-Pfad (magnozellulär = M) und den P-Pfad (parvozellulär = P). Beide Pfade leiten Informationen über das CGL und V1 in extrastriäre Areale, wobei jeder Pfad im Wesentlichen in kortikale Areale sendet, die auf die Weiterverarbeitung der unterschiedlichen Informationen spezialisiert sind (hier: M-System projiziert u.a. in V3, V5; P-System projiziert u.a. in V4, IT). Die Abbildung 12.2 und 12.3 verdeutlichen schematisch und stark vereinfacht die zwei separierten visuellen Systeme (vgl. Karnath & Thier, 2003; vgl. Pinel, 2001).

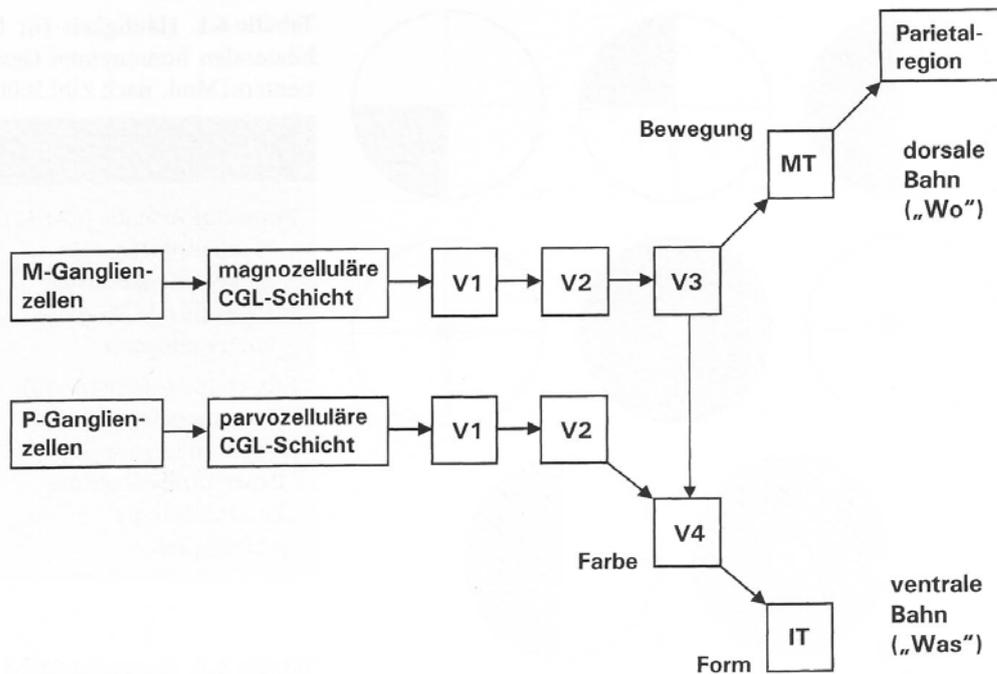


Abbildung 12.2: Stark vereinfachte Darstellung der retinogenikulosträren Bahn sowie ein Ausschnitt ihrer kortikalen Projektionsgebiete im menschlichen Gehirn. (Quelle: Karnath & Thier, S. 75, 2003)

Anmerkung: V1 = primärer visueller Kortex; V2, V3, V4 = extrasträre visuelle Assoziationskortex; CGL = Corpus geniculatum laterale; MT = V5 = mediales temporales Areal; IT = inferiotemporaler Kortex

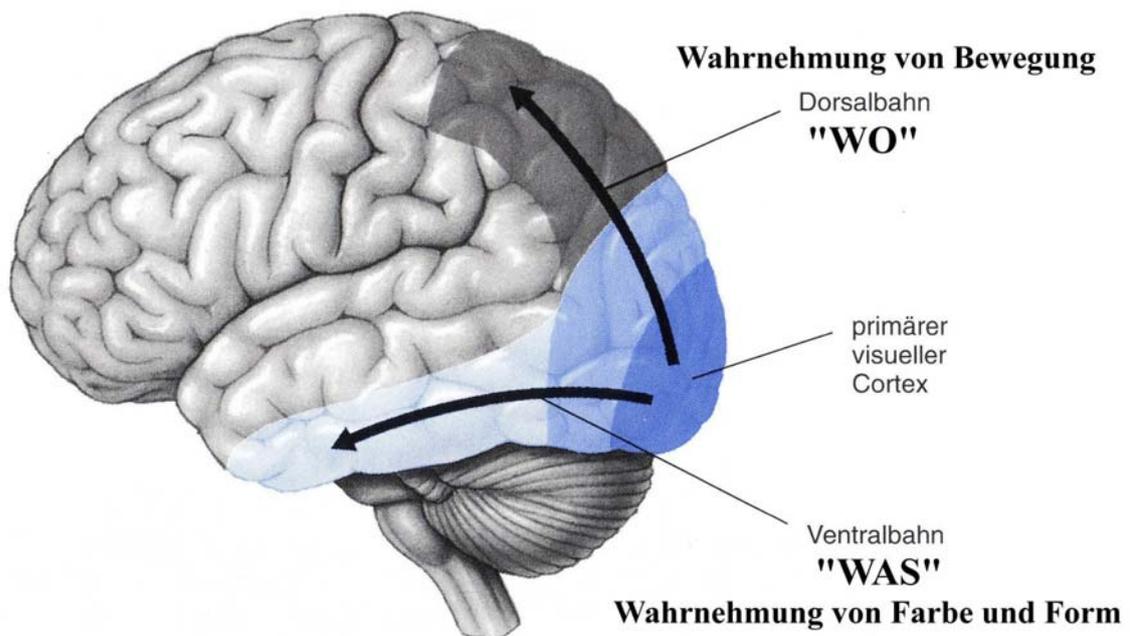


Abbildung 12.3: Vereinfachte Darstellung des dorsalen und ventralen Pfades anhand der lateralen Ansicht des Gehirnes. (Quelle: modifizierte Abbildung aus Pinel, 2001, S. 206)

12.2 Lage und Funktion

Lage

Das M-System führt von V1 über den dorsalen prästriären Kortex zum posterioren parietalen Kortex (okzipitoparietal) und wird aus diesem Grund auch als **dorsaler Pfad** (= dorsal stream) bezeichnet. Ein weiterer Teil des Parietallappens ist der superiore parietale Kortex (= SPC). Die interessanten Areale des SPC umfassen BA 7a (= Area PG) und 7b (= Area PF) (vgl. Abbildung 12.6). Die P-Bahn wird in der Literatur als **ventraler Pfad** (= ventral stream) gekennzeichnet, da sie im Gegensatz zum dorsalen Pfad von V1 über den ventralen prästriären Kortex zum Gyrus temporalis inferior verläuft (okzipitotemporal) (vgl. Donner, 2003). Wie bereits in Abschnitt 3.3.5 beschrieben, stellt der ventrale Pfad einen Teil des *Gyrus fusiformis* dar. Der Gyrus fusiformis entspricht folgenden Brodmann-Arealen: BA 18 und 19 (Okzipitallappen), BA 20 und 36 (Temporallappen) und BA 37 (Temporal-Okzipitallappen). Da BA 18 und 19 den sekundären visuellen Kortex darstellen, sind diese Areale sowohl Teile des dorsalen Bahn, als auch des Gyrus fusiformis. Um Aktivitäten in V2, die sich gegenseitig herausmitteln, zu vermeiden, wird die dorsale Bahn durch BA 7a / 7b gekennzeichnet (siehe Abbildung 12.4) und die ventrale Bahn durch die Brodmann-Areale 20, 26 und 37 (siehe Abbildung 12.5). Die anatomische Lage beider Projektionsbahnen kann der Abbildung 12.4 entnommen werden. Im Folgenden wird die dorsale Bahn immer durch BA 7a / 7b und die ventrale durch BA 20, 36 und 37 charakterisiert, um Aktivierungen, die beiden Pfaden zuordenbar wären, auszuschließen.

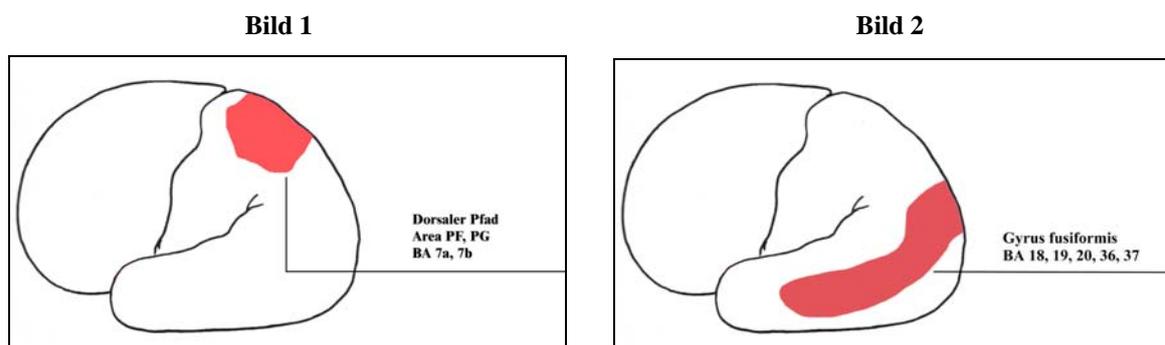


Abbildung 12.4: **Bild 1** Laterale Ansicht des Gehirnes: Area PG (= 7a) und Area PF (= 7b) (Dorsaler Pfad); **Bild 2** Laterale Ansicht des Gehirnes: BA 18, 19, 20, 36, 37 (Gyrus fusiformis) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 206, 1999)

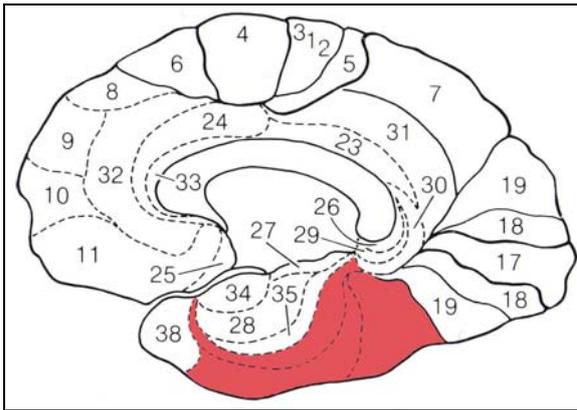


Abbildung 12.5: Mediale Darstellung des Gehirnes: BA 20, 36, 37 (Ventraler Pfad) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Kolb & Whishaw, S.48, 1996)

Funktionen

Simplifiziert dargestellt dient der dorsale Pfad der *Analyse von Bewegungen* und liefert somit „WO“-Informationen, wogegen der ventrale Pfad Informationen zu *Farbe und Form* verarbeitet; sogenannte „WAS“-Informationen (vgl. Karnath & Thier, 2003) (vgl. Abbildung 12.2). Zu genauen Angaben dieser beiden Systeme bezüglich ihrer Funktionen sollen im Folgenden verschiedene Modellansätze kurz diskutiert werden, wobei der Schwerpunkt des Interesses auf den Ergebnissen des dorsalen Pfades liegt.

12.3 Entwicklungen der Modellvorstellungen zum dorsalen und ventralen Pfad

Die ersten Studien zur Erforschung der Existenz von zwei visuellen Systemen führten Schneider (1969) und Trevarthen (1968) an Hamstern und „split-brain“-Primaten durch. Schneider fand noch stark simplifiziert heraus, dass das visuelle Kortexsystem für die Wahrnehmung von Mustern und Raum verantwortlich ist, wogegen das superiore Colliculussystem nur den Raum wahrnimmt (vgl. Schneider, 1969). Ähnliche Ergebnisse wurden von Trevarthen (1968) berichtet, der die Verarbeitung von „WO“-Informationen im dorsalen Pfad den „WAS“-Informationen im ventralen Pfad gegenüberstellt (vgl. Trevarthen, 1968). Mishkin & Ungerleider (1982) und Mishkin, Ungerleider & Macko (1983) stimmten mit der Vorstellung zweier unabhängiger Informationsströme überein, die unterschiedlich verarbeiten, und manifestierten diese Theorie durch Läsionsstudien. So konnten sie feststellen, dass bei Schäden des dorsalen bzw. ventralen Pfades nur bestimmte Aspekte der visuellen Wahrnehmung betroffen waren. Allerdings argumentierten sie für

einen zusätzlichen Pfad, der für beide Formen der Perzeption verantwortlich sei (vgl. Mishkin & Ungerleider, 1982; Mishkin et al., 1983). Diese Annahme eines weiteren, dritten Verarbeitungsweges vermuteten auch Boussaoud, Ungerleider und Desimone (1990) anhand der Ergebnisse ihrer Untersuchungen. Sie fanden bei Makaken im extrastriären Kortex eine zusätzliche Bahn zur Bewegungsanalyse, die in der Region des Sulcus temporalis superior (STS) liegt. Vermutlich gibt es Interaktionen zwischen dem „WO“- und dem „WAS“-Pfad (vgl. Boussaoud et al., 1990). Neuere Angaben zum visuellen System mit zwei unabhängigen Bahnen machten Goodale & Milner (1992) und Milner & Goodale (1993). Die Autoren stimmten mit den bereits ernannten Arealen von beiden Systemen überein, machten aber weiterführende Angaben zu deren Funktionen. Der Unterschied ihrer Ansicht gegenüber der von Mishkin & Ungerleider (1982) und Mishkin et al. (1983) bestand darin, dass sie den *Zweck* der Information als Hauptkriterium in den Vordergrund stellten und nicht die *Art* der Information. Nach ihrer Meinung dient der dorsale Pfad dazu, die direkte Interaktion mit Objekten zu steuern (Handlungskontrolle). Die ventrale Bahn dagegen vermittelt die bewusste visuelle Wahrnehmung von Objekten. Damit stellten sie ihre weiterführende „Verhaltenskontrolle“- versus- „bewusste Wahrnehmungs“-Theorie der bisherigen „WO“- versus- „WAS“-Theorie gegenüber (vgl. Goodale & Milner, 1992; vgl. Milner & Goodale, 1993).

12.4 Die Funktion des dorsalen Pfades bei der Verarbeitung bewegter Bilder und bei der Perzeption von Fremd- und Eigenbewegungen

Aufgrund unterschiedlicher Messmethoden, Stichproben und Fragestellungen kann man zahlreiche Vermutungen bezüglich der Funktionen des dorsalen Pfades ableiten. Der Parietallappen lässt sich in folgende Bereiche gliedern: posteriorer parietaler Kortex (= PPC); superiorer parietaler Kortex (= SPC) und inferiorer parietaler Kortex (= IPC). Die Brodmann-Areale 7a (Area PG) und 7b (Area PF) lassen sich dem SPC, das Areal 40 dem IPC zuordnen. Areale PF und PG sind Teile der dorsalen Bahn und vermutlich aktiv, wenn Verhalten im Raum gesteuert und kontrolliert werden soll. Außerdem spielen sie eine Rolle beim Erhalt von Informationen über Eigenbewegungen (z. B. Stellung der Gliedmaßen), Erkennen von Winkeln oder Handstellungen, und leiten bereits weiterverarbeitete, relevante Informationen an das motorische System weiter (vgl. Kolb & Whishaw, 1996). Mallot & Thier (vgl. Mallot & Thier, In: Karnath & Thier, 2003) messen

dem SPC ebenfalls eine hohe Bedeutung bei der Bewegungsregulation bzw. -handlung bei. In den Arealen 7a und 7b überwiegt die Verarbeitung visueller und somatosensorischer Eigenschaften von Bewegungen. Dieser Anteil trägt zur Raumorientierung und sensorischen Kontrolle von Bewegungen bei.

Des Weiteren existieren weitere Areale, die Bestandteile des dorsalen Pfades sind und ebenfalls wie 7a und 7b eine Rolle bei der Bewegungsregulation einnehmen. Dabei handelt es sich um folgende Areale: Area MT, Area MST (mit den Anteilen MSTd und MSTl), Area MIP und Area AIP. Ihre Funktionen seien im Zusammenhang der Wahrnehmung von Bewegungen kurz umrissen, wurden aber bei der Festlegung der Region of interest (ROI) „Dorsaler Pfad“ nicht berücksichtigt. Dieser ROI wurde durch Area PG (BA 7a) und Area PF (BA 7b) charakterisiert. Die Abbildung 12.6 zeigt die Verknüpfungen zwischen dem dorsalen und ventralen Pfad mit Schwerpunkt auf den dorsalen Bewegungswahrnehmungsarealen.

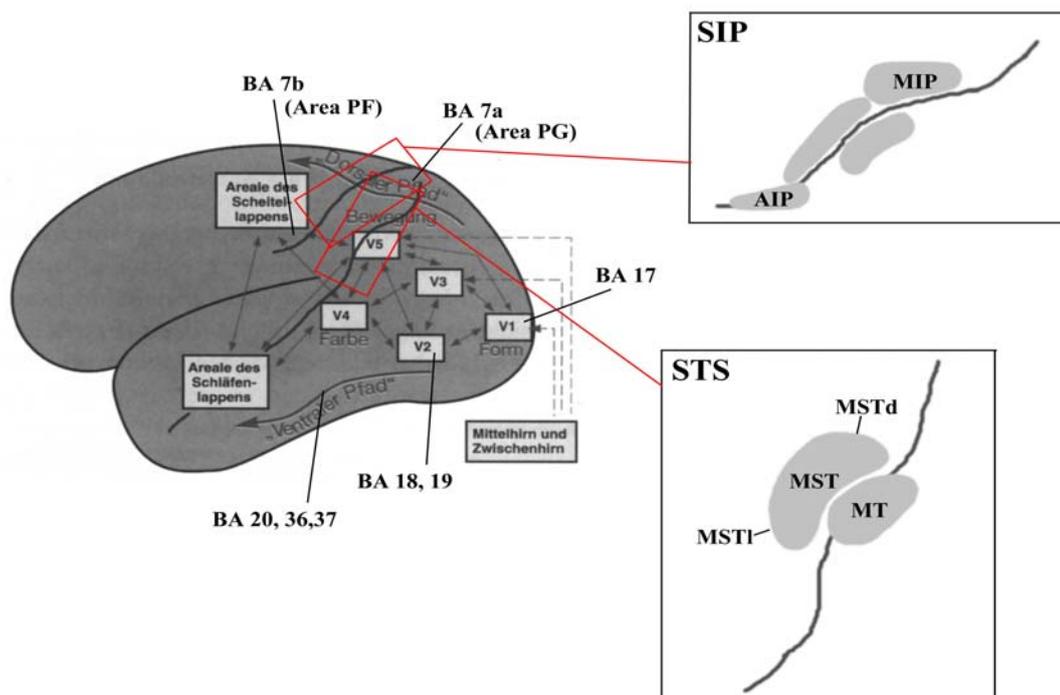


Abbildung 12.6: Parallelverarbeitung von visuellen Reizen im dorsalen und ventralen Pfad sowie Darstellung der anatomischen Lokalisationen der Areale zur Bewegungswahrnehmung; laterale Ansicht des Gehirnes (Quelle: modifizierte Abbildung aus Karnath & Thier, 2003, S. 39 und S. 157)

Anmerkung: BA = Brodmann-Areale; V1 = primärer visueller Kortex; V2, V3, V4 = extrastriäre visuelle Assoziationskortex; CGL = Corpus geniculatum laterale; Area PF = anterior sector of IPL (inferior parietal lobule); Area PG = posterior sector of IPL; SIP = Sulcus intraparietalis; STS = Sulcus temporalis superior; MIP = medial intraparietal area; AIP = anterior intraparietal area; MT = medio temporal area; MST = medio superior temporal area; MSTl = lateraler Anteil; MSTd = dorsaler Anteil

Die Area MT (= „middle temporal area“ = V5) ist zuständig für die Verarbeitung von Geschwindigkeiten der Bewegungsreize, und ist durch eine hohe Anzahl richtungsselektiver Neurone charakterisiert. Diese reagieren hauptsächlich auf Gelenkbewegungen (propriozeptive Anteile, Körperhaltung). Area MT reagiert bevorzugt auf kleine, bewegte Objekte, die hauptsächlich dann entstehen, wenn sich der eigene Körper aktiv bewegt (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003). Die Area MST (mit dorsalem Anteil MSTd und lateralen Anteil MSTl; benachbart zur Area MT) dient der Extraktion visueller Bewegungen. Bei Zeigebewegungen mit der eigenen Hand wird die Area MIP („parietal reach area“) aktiviert, wogegen Area AIP („anterior intraparietal“) bei der Vorbereitung von Griffformationen eine entscheidende Rolle spielt. Das M-System kodiert im Wesentlichen globale, räumliche Informationen und bewegte Reize (vgl. Karnath & Thier, 2003). Wie bereits beschrieben, ist der dorsale Pfad für die Objektlokalisierung (WO) und räumliche Lokalisation der Gegenstände verantwortlich. Im Gegensatz zur ventralen Bahn müssen hier alle visuell gesteuerten Bewegungen kontrolliert werden, wobei Birbaumer & Schmidt (2003) die Präsentation des extrapersonalen Raumes dem IPC zuschreiben. Nach Auffassung der Autoren sind die Brodmann-Areale 7, 39 und 40 für die Raumwahrnehmung zuständig (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003).

Spiegelneurone („mirror neurons“)

Die am häufigsten untersuchten und bestätigten Funktionen der dorsalen Bahn bezogen sich bisher auf die Regulation und Kontrolle von aktiv ausgeführten Eigenbewegungen. Welche Funktion aber hat der Parietallappen, wenn Fremdbewegungen wahrgenommen werden oder sich die Versuchsperson einen Bewegungsablauf nur vorstellt, ihn aber nicht aktiv ausführt? Es ist hinreichend bekannt, dass die Beobachtung von sinnvollen Mund-, Hand- oder Fußbewegungen bei anderen Personen zu Aktivierungen bei der beobachtenden Person in den entsprechenden Arealen, die bei der Ausführung derselben, eigenen Bewegung beteiligt wären, führen (vgl. Buccino et al., 2001). Rizzolatti, Fadiga, Fogassi und Gallese (1999) fanden diese Aktivierungen bei Makaken. Beide Forschergruppen fanden bei den Affen Neuronen, die sowohl feuerten, wenn die Affen eine spezielle Handbewegung machten, als auch, wenn sie einen anderen Affen bzw. einen Menschen bei der Ausführung der gleichen Bewegung beobachteten. Die Forscher definierten diese spezielle Untergruppe von prämotorischen Neuronen, die vermutlich Wahrnehmung und Ausführung von Bewegungen steuern, als sogenannte

„Spiegelneurone“ (= *mirror neurons*) und vermuteten, dass diese Neurone die Grundlage von Imitationen darstellen. Bei Affen fanden sie Spiegelneurone in *Area F5* (vgl. Rizzolatti et al., 1999; vgl. di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 1992). Gallese & Goldman (1998) schränken allerdings ein, dass neben der Funktion der Spiegelneurone beim Imitieren die Funktion der Neurone als Element eines Interaktions- und Kommunikationsnetzwerkes ebenso wahrscheinlich ist. Auch bei Menschen konnte inzwischen die Existenz von Spiegelneuronen nachgewiesen werden, wenn sie (internale oder sichtbare) Bewegungen, die eine andere Person durchführt, reproduzieren. Buccino, Binkofski und Riggio (2004) konnten den Nachweis für die Existenz solcher Neurone erbringen und sie zunächst eindeutig im Broca-Zentrum manifestieren. Die Autoren vermuten allerdings ein komplexes Spiegelneuronensystem im Gehirn (vgl. Buccino et al., 2004). Von großem Interesse ist der erbrachte Nachweis von Spiegelneuronen im Parietallappen und prämotorischen Kortex des menschlichen Gehirnes bei der Beobachtung von Bewegungen (vgl. Buccino et al., 2001). Bei fMRT-Experimenten wurde der rechte superiore Parietallappen aktiviert, wenn der Proband Fingerbewegungen imitieren sollte (vgl. Iacoboni et al., 1999). Ergebnisse von solchen fMRT-Untersuchungen unterliegen allerdings einer anderen Größenordnung als Befunde aus Untersuchungen an selektiven Neuronen. Auch Thier (2003) bestätigte, dass Area 40 (Teil des IPC) bei visuell-räumlicher Vorstellung und Bewegungsvorstellung aktiviert wird (vgl. Thier In: Karnath & Thier, 2003). Es liegt folglich die Vermutung nahe, dass Spiegelneurone im Parietallappen auch dann aktiviert werden, wenn eine Versuchsperson ein nicht-bewegtes Bild betrachtet, welches Bewegungen impliziert (durch bewegungsinduzierende Inhalte) und vorbahnt, diese von der Person aber nicht aktiv ausgeführt, sondern internal imaginiert durchgeführt werden. Wenn die beschriebenen Spiegelneurone existieren, liegt die Vermutung nahe, dass die untersuchten Versuchspersonen, die sich eine Bewegung aktiv vorstellen, Aktivierungen zeigen. Solche internalen Nachahmungen könnten z. B. durch die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“ induziert werden. Aktivierungen werden thesengeleitet im SPC des Parietallappens vermutet.

13 Hypothesen des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad

Bezüglich der eben dargestellten Befunde aus der Literatur zum dorsalen Pfad kann zusammengefasst werden, dass der dorsale Pfad an zahlreichen Aufgaben beteiligt ist, die mit der Wahrnehmung bewegungsrelevanter Informationen zusammenhängen. So ist diese Struktur unter anderem maßgeblich an der Verarbeitung der Wahrnehmung von z. B. Handbewegungen, Stellungen der Hände zueinander, zielgerichtete Bewegungen und Informationen über eigene Bewegungen beteiligt (vgl. Karnath & Thier, 2003). Zusätzlich erbrachte der Nachweis von Spiegelneuronen in den dorsalen Strukturen den Beweis, dass die Beobachtung von aktiven und passiven Bewegungen zu Aktivierungen im dorsalen Pfad aufgrund von internaler Nachahmung der gesehenen Bewegungen führt (vgl. Rizzolatti et al., 1999; vgl. di Pellegrino et al., 1992).

Die in dieser Studie dargebotenen Bilder zeigen in den meisten Fällen bewegungsinduzierende oder bewegungsrelevante Merkmale. Da es sich in vier Kategorien um statische Bilder von realen Gebärden aus der Gebärdensprache handelt, vermute ich, dass die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher alle relevanten Informationen dieser Bilder diskriminieren, um (gemäß der Aufgabenstellung) die Gebärde in das entsprechende Wort zu dekodieren. Die hörenden Kontrollgruppen werden die Bilder auf vermutlich vergleichbare Weise diskriminieren, um anhand von internaler Bewegungsnachahmung zumindest eine mögliche Bedeutung hinein zu interpretieren, da ihnen die tatsächliche Bedeutung aufgrund mangelnder Gebärdensprachkompetenz verwehrt bleibt. Aus diesem Grund wird für den dorsalen Pfad folgende gerichtete Hypothese aufgestellt:

Hypothese 10: Alle Gruppen weisen Aktivierungen im dorsalen Pfad auf die Kategorien auf, die bewegungsrelevante oder bewegungsinduzierende Merkmale enthalten.

Für den ventralen Pfad wird hier nicht wiederholt eine Hypothese formuliert, da die Annahmen bezüglich dieser Struktur schon mit den Hypothesen 5 und 6 in Kapitel 4.3 behandelt wurden. Der ventrale Pfad wird aber sowohl bezüglich der Ergebnisse als auch in der Diskussion im Zusammenhang mit dem dorsalen Pfad diskutiert, da diese beiden Strukturen bei der Objektwahrnehmung und der Diskriminierung aller Merkmale eng miteinander verknüpft sind.

14 Ergebnisse des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad

1. Vergleich: Gehörlose (GL) und Kontrollgruppe 1 (K1)

Im ersten Paarvergleich sind die Aktivierungsmuster auf die dargebotenen visuellen Stimuli der Tabelle 14.1 für den SPC (= Teil des dorsalen Pfades) und der Tabelle 14.2 für den ventralen Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis) zu entnehmen. Der dorsale Pfad wurde auf die Brodmann-Areale 7a und 7b eingegrenzt, da diese Areale dem SPC entsprechen, dem eine entscheidende Funktion bei bewegungsrelevanten Stimuli zugesprochen wird. Zur klaren Abgrenzung des ventralen Pfades wurden die Brodmann-Areale 20, 36 und 37 festgelegt. Der ventrale Pfad besteht somit aus Anteilen des Gyrus fusiformis und den visuellen Assoziationskortexen. Die ersten beiden Spalten zeigen die signifikanten Voxel je Gruppe gegen die Baseline (Fixationskreuz). Die folgenden Spalten verweisen auf die Aktivierungsunterschiede im Gruppenvergleich.

Tabelle 14.1: Aktivierungen im dorsaler Pfad (= superioren parietalen Kortex) für die Vergleiche Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose>Kontrollgruppe1; Kontrollgruppe1>Gehörlose

Bedingung Lateralität	GL BA 7a, 7b (SPC)		K1 BA 7a, 7b (SPC)		GL > K1 BA 7a, 7b (SPC)		K1 > GL BA 7a, 7b (SPC)	
	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value	TAL	T-value / NrofVo p-value
Wort R			21 -66 34	7,41 / 57 0,000023			15 -51 49	4,47 / 19 0,00026
	L		-22 -64 31	7,60 / 58 0,000018			-24 -49 42	5,50 / 53 0,000026
Pfeil R			19 -61 42	10,19 / 164 0,000001			24 -61 42	4,72 / 85 0,00015
	L		-26 -68 33	10,32 / 127 0,000001			-24 -68 33	5,25 / 47 0,000046
Gesten R	21 -61 42	5,82 / 7 0,00025	21 -73 37	8,83 / 61 0,000005			29 -55 52	4,48 / 16 0,00026
	L		-27 -67 34	6,13 / 26 0,00011				
Statisch R			18 -67 42	6,42 / 61 0,000076			24 -50 46	3,71 / 6 0,0015
	L		-24 -73 40	5,44 / 43 0,00029			-27 -56 46	3,40 / 10 0,003
Sinnlos R			15 -79 42	6,36 / 66 0,000083				
	L		-18 -79 34	5,52 / 27 0,00026			-18 -79 31	3,72 / 4 0,0015
Objekt R	21 -61 42	7,33 / 14 0,000044	21 -67 42	9,25 / 97 0,000003			22 -64 42	5,25 / 27 0,000045
	L		-22 -64 31	8,09 / 54 0,000011			-21 -79 31	4,52 / 10 0,00024

Anmerkung^a: $p < 0,005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Zusammenfassend zeigten sich signifikante Aktivierungen in der dorsalen Bahn bei allen Kategorien für die hörende Gruppe K1. Die Gehörlosen wiesen für nur zwei der dargebotenen Bilderkategorien vernachlässigbare Aktivierungen (aufgrund der hohen Aktivierungen von K1) in 7a und 7b auf. Bezüglich des ventralen Pfades zeigten sich wie bereits in Abschnitt 7.3 beschrieben, stärkere Aktivierungen des K1 gegenüber den Gehörlosen (K1 > GL) (vgl. Tabelle 14.2).

Tabelle 14.2: Aktivierungen im ventralen Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis) für die Vergleiche Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose>Kontrollgruppe1; Kontrollgruppe1>Gehörlose

Bedingung	Lateralität	GL BA 20,36,37			K1 BA 20,36,37			GL > K1 BA 20,36,37			K1 > GL BA 20,36,37		
		TAL	T-value / NrofVo p-value		TAL	T-value / NrofVo p-value		TAL	T-value / NrofVo p-value		TAL	T-value / NrofVo p-value	
Wort	R	38 -62 -15	10,83 / 50 0,000002		27 -45 -15	10,17 / 119 0,000001					43 -65 -13	3,96 / 12 0,00085	
	L	-48 -57 -17	11,59 / 101 0,000001		-48 -62 -19	10,44 / 191 0,000001					-58 -54 -16	3,86 / 16 0,0011	
Pfeil	R	39 -63 -14	11,11 / 119 0,000001		26 -43 -15	10,37 / 191 0,000001					40 -57 -16	4,89 / 18 0,0001	
	L	-51 -73 -1	10,53 / 195 0,000002		-54 -61 -2	10,38 / 191 0,000001					-45 -63 -1	4,28 / 11 0,0004	
Gesten	R	40 -57 -17	9,09 / 78 0,000008		30 -48 -15	10,42 / 166 0,000001					40 -66 8	5,04 / 26 0,000073	
	L	-57 -70 4	11,53 / 123 0,000001		-54 -67 -1	10,10 / 189 0,000001					-50 -60 1	5,17 / 14 0,000054	
Statisch	R	39 -63 -15	11,44 / 87 0,000001		29 -47 -15	10,12 / 153 0,000001					37 -61 -15	4,65 / 6 0,00018	
	L	-51 -67 1	11,38 / 147 0,000001		-51 -58 -3	10,40 / 154 0,000001							
Sinnlos	R	39 -61 -15	11,59 / 87 0,000001		30 -42 -19	10,07 / 146 0,000001					37 -61 -15	4,74 / 12 0,00014	
	L	-53 -64 -8	11,13 / 129 0,000001		-48 -69 -1	10,31 / 161 0,000001							
Objekt	R	39 -55 -17	10,83 / 69 0,000002		29 -47 -14	10,29 / 167 0,000001					46 -65 -13	5,25 / 20 0,000046	
	L	-54 -67 -1	11,31 / 147 0,000001		-63 -52 -14	10,41 / 191 0,000001					-47 -54 -15	4,04 / 7 0,0007	

Anmerkung^a: $p < 0,005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

2. Vergleich: Gebärdensprachdolmetscher (D) und Kontrollgruppe 2 (K2)

Analog zu den beiden letzten Tabellen sind im Folgenden die Aktivierungen des Gruppenpaares Dolmetscher und Kontrollgruppe 2 dargestellt. Tabelle 14.3 zeigt die Aktivierungen bezüglich des dorsalen Pfades, Tabelle 14.4 die des ventralen Pfades.

Tabelle 14.3: Aktivierungen im dorsaler Pfad (= superiores parietalen Kortex) für die Vergleiche Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher>Kontrollgruppe2; Kontrollgruppe2>Dolmetscher

Bedingung / Lateralität	D BA 7a, 7b (SPC)				K2 BA 7a, 7b (SPC)				D > K2 BA 7a, 7b (SPC)				K2 > D BA 7a, 7b (SPC)				
	TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		
Wort	R																
	L																
Pfeil	R	21	-61	43	12,83 / 65 0.000004	27	-55	43	7,51 / 123 0.000037								
	L	-24	-67	42	15,57 / 84 0.000001	-39	-58	49	10,94 / 120 0.000002								
Gesten	R	21	-58	42	8,4 / 3 0.000064	33	-49	61	4,85 / 10 0.00091								
	L																
Statisch	R	24	-53	42	6,17 / 23 0.00046	13	-69	55	7,46 / 67 0.000039								
	L	-27	-67	34	8,24 / 21 0.000076	-39	-58	47	7,66 / 16 0.000031								
Sinnlos	R	21	-58	46	6,27 / 20 0.00042	24	-50	42	6,55 / 14 0.00011								
	L	-33	-49	49	7,47 / 19 0.00014	-39	-58	49	7,48 / 7 0.000038								
Objekt	R	29	-52	52	5,88 / 16 0.00061	24	-64	43	6,89 / 36 0.00072								
	L	-24	-81	31	6,39 / 7 0.00037	-37	-59	52	7,29 / 12 0.000046								

Anmerkung^a: $p < 0,005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Tabelle 14.4: Aktivierungen im ventralen Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis) für die Vergleiche Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher>Kontrollgruppe2; Kontrollgruppe2>Dolmetscher

Bedingung / Lateralität	D BA 20,36,37				K2 BA 20,36,37				D > K2 BA 20,36,37				K2 > D BA 20,36,37				
	TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		TAL		T-value / NrofVo p-value		
Wort	R	38	-62	-15	12,92 / 75 0.000004	43	-67	-1	7,76 / 42 0.000028								
	L	-42	-57	-19	14,38 / 133 0.000002	-51	-73	-1	8,40 / 64 0.000015								
Pfeil	R	33	-39	-17	14,87 / 161 0.000001	36	-49	-15	11,63 / 135 0.000001								
	L	-60	-64	1	15,43 / 194 0.000001	-51	-69	-1	11,41 / 185 0.000001								
Gesten	R	36	-34	-20	14,92 / 132 0.000001	41	-64	2	11,16 / 126 0.000001								
	L	-54	-65	-15	15,52 / 180 0.000001	-48	-69	1	11,23 / 115 0.000001								
Statisch	R	33	-39	-19	15,08 / 122 0.000001	24	-38	-15	11,42 / 117 0.000001								
	L	-48	-65	-15	15,36 / 148 0.000001	-54	-68	-1	11,56 / 155 0.000001								
Sinnlos	R	33	-39	-17	15,58 / 150 0.000001	35	-52	-15	11,21 / 109 0.000001					43	-57	-19	4,07 / 6 0.00088
	L	-48	-61	-19	15,12 / 130 0.000001	-51	-69	-1	11,33 / 142 0.000001								
Objekt	R	30	-46	-14	14,05 / 131 0.000002	35	-52	-15	11,21 / 103 0.000001								
	L	-45	-58	-19	14,67 / 146 0.000002	-48	-64	-14	11,50 / 161 0.000001								

Anmerkung^a: $p < 0,005$; Voxelgröße: $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$; cut off: 3 Voxel

Anmerkung^b: Baseline: Fixationskreuz

Der Gruppenvergleich Dolmetscher versus Kontrollgruppe 2 macht deutlich, dass diese beiden Gruppen im dorsalen Pfad für alle Kategorie außer Wort signifikante Aktivierungen aufweisen und somit vergleichbare Ergebnisse zur Kontrollgruppe 1 zeigen. Für den ventralen Pfad gibt es auch in diesem Gruppenvergleich keine nennenswerten Gruppenunterschiede.

Die Abbildung 14.1 zeigt beispielhaft dorsale Aktivierungen im SPC bei der bewegungsinduzierenden Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ von D, K1 und K2 im Gegensatz zur gehörlosen Gruppe in der linken Hemisphäre. Die Abbildung 14.2 bezieht sich auf den gleichen Vergleich bezüglich der rechten Hemisphäre. In der Abbildung 14.3 ist die Aktivierung des dorsalen Pfades im direkten Vergleich K1>GL dargestellt. Die dargestellten Aktivierungsmuster in der vorher festgelegten Region of interest *superiorer parietaler Kortex* stellen sich für die auditiv deprivierte Gruppe gegenüber allen hörenden Gruppen (= D, K1, K2) durchaus unterschiedlich dar. Auf die Darbietung der Bilder „Gebärden mit Pfeil“ sind zwischen den Gruppen deutlich verschiedene Aktivierungen zu verzeichnen. Die gemittelten anatomischen Gehirne wurden im standardisierten „stereotaxis space“ von Talairach und Tournoux[®] transformiert. Die Aktivierungen als Reaktion auf visuelle Reize fallen in die Brodmann-Areale 7a und 7b. Die Farbskala zur Verdeutlichung des Aktivierungsausmaßes (= FIT-Skala) können den Abbildungen aus Abschnitt 10.2 entnommen werden.

Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen bezüglich des dorsalen und ventralen Pfades befinden sich in Anhang N auf der beigefügten CD.

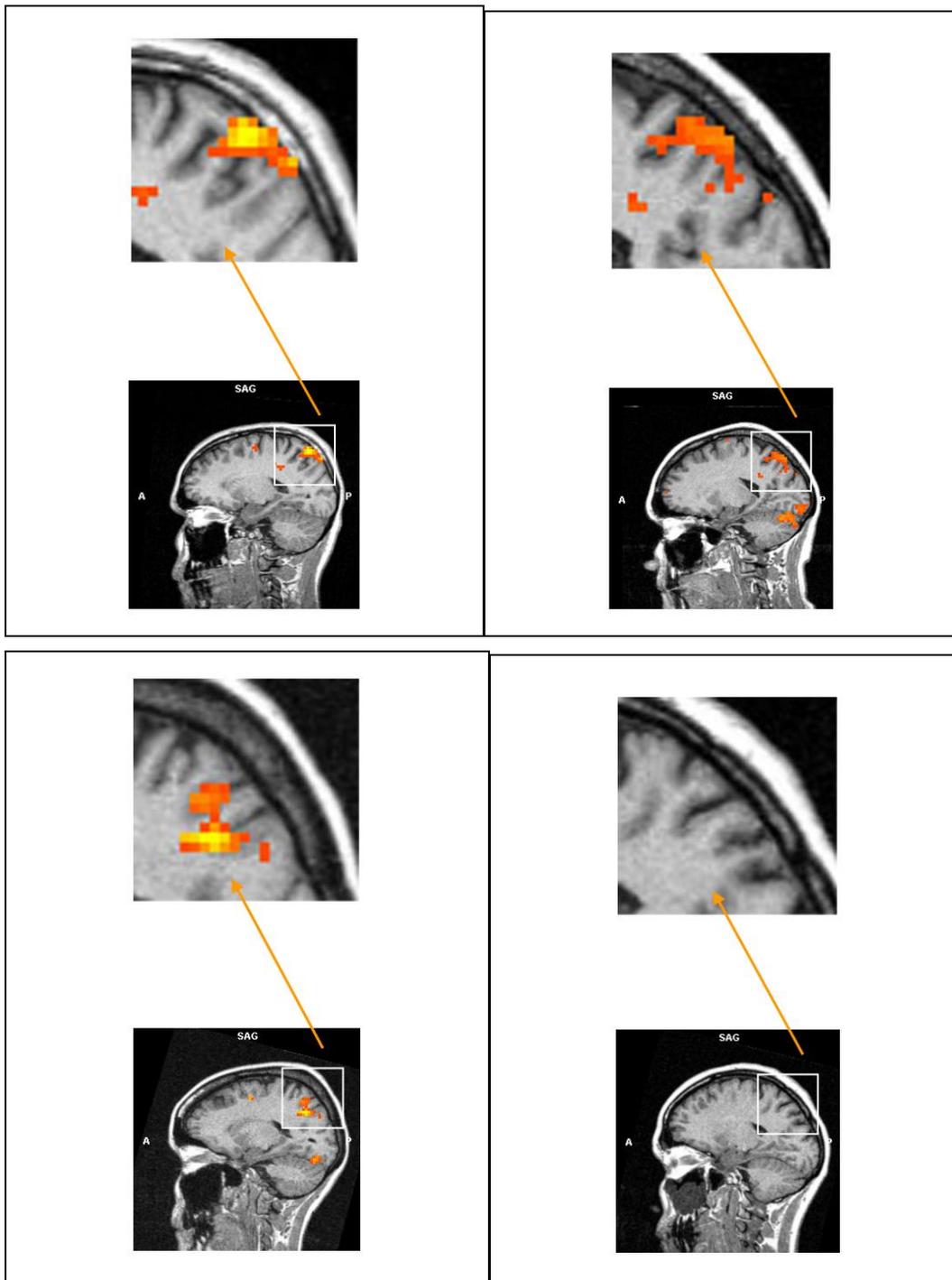


Abbildung 14.1: Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“ gegen Baseline Fixationskreuz

Anmerkung^a: v.l.o.n.r.u.: Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 1; Gebärdensprachdolmetscher; Gehörlose

Anmerkung^b: Schnittebene: sagittal

Anmerkung^c: Ansicht der Gehirne: linke Hemisphäre (A = anterior, P = posterior)

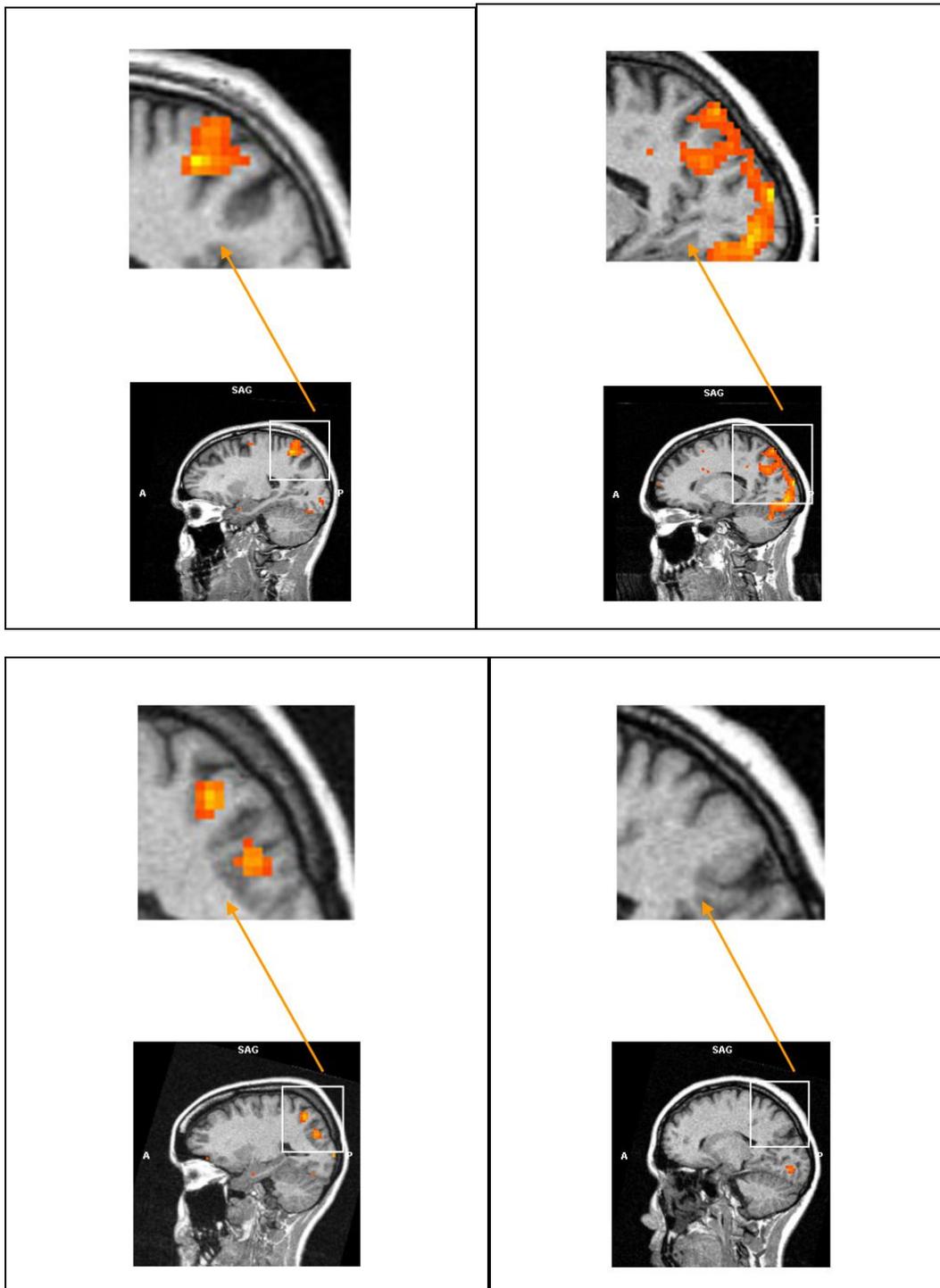


Abbildung 14.2: Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“ gegen Baseline Fixationskreuz

Anmerkung^a: v.l.o.n.r.u.: Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 1; Gebärdensprachdolmetscher; Gehörlose

Anmerkung^b: Schnittebene: sagittal

Anmerkung^c: Ansicht der Gehirne: rechte Hemisphäre (A = anterior, P = posterior)

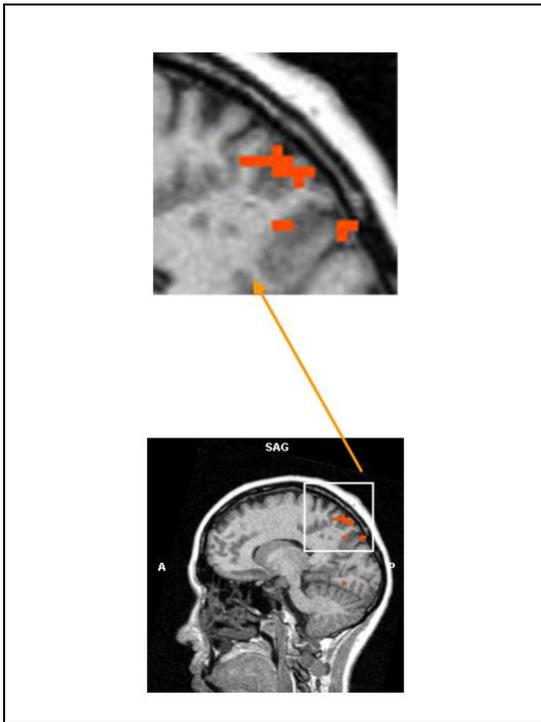


Abbildung 14.3: Gruppenvergleich der Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“

Anmerkung^a: Kontrast: Kontrollgruppe 1 > Gehörlose

Anmerkung^b: Schnittebene: sagittal

Anmerkung^c: Ansicht der Gehirne: rechte Hemisphäre (A = anterior, P = posterior)

15 Diskussion des Bilder-Paradigmas: dorsaler Pfad, ventraler Pfad

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich des dorsalen und ventralen Pfades diskutiert. Obwohl die Diskussion zum ventralen Pfad bereits in Abschnitt 7.3 dargestellt wurde, sollen seine Aktivierungen hier erneut im Kontext des dorsalen Pfades diskutiert werden.

Bei der Diskussion der Ergebnisse des dorsalen Pfades soll darauf hingewiesen werden, dass sich die Diskussion auf die Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ zur beispielhaften Veranschaulichung beschränkt, da diese Kategorie die meisten bewegungsrelevanten Informationen enthält. Somit gilt diese Kategorie stellvertretend für die Merkmale, die vordergründig im dorsalen Pfad verarbeitet werden.

15.1 Diskussion zum dorsalen Pfad

Zu Beginn soll das wesentliche Ergebnis zusammengefasst dargestellt werden. Alle hörenden (K1, K2, D) Gruppen wiesen in der hier zur Veranschaulichung gewählten Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ deutliche Aktivierungen in den Arealen 7a und 7b auf. Die Gehörlosen zeigten dagegen keine Aktivierungen in dieser Bedingung. Im Folgenden werden die Teilergebnisse bezüglich des superioren parietalen Kortex (= dorsaler Pfad) detailliert dargestellt. Zahlreiche Untersuchungen aus der Literatur zeigen allerdings durchaus kontroverse Ergebnisse in Bezug auf die gefundenen Aktivierungen im dorsalen Pfad bei der hier untersuchten gehörlosen Gruppe. Diese Studien sollen im Folgenden im Kontext der hier gefundenen Ergebnisse diskutiert werden.

Mitchell (2002b) untersuchte in einer EEG-Studie Gehörlose und Hörende und postulierte, dass die Gehörlosigkeit zu nachhaltigen Veränderungen des dorsalen Pfades führt. Durch die Darbietung bewegter Punktwolken (*motion stimuli*) wurde folgendes Ergebnis gefunden: in der Gruppe der Gehörlosen konnten reliabel-größere Amplituden der ERPs (= event related potentials) abgeleitet werden. In einer anschließenden fMRT-Studie zeigten die auditiv Deprivierten ebenfalls höhere Aktivierungen im Areal MT (Teil des dorsalen Pfades) gegenüber ihrer hörenden Kontrollgruppe (vgl. Mitchell, 2002b). Die Studie wird in diesem Zusammenhang genannt, da sie Aktivierungen von Gehörlosen in einem Areal

untersucht, welches neben anderen Teilen des dorsalen Pfades visualisierte Bewegungswahrnehmung verarbeitet. Folglich werden die Ergebnisse der definierten Areale PF und PG diskutiert, da diesen Arealen die Funktion der Bewegungswahrnehmung nachgesagt wird. Es muss allerdings kritisch angemerkt werden, dass die Ergebnisse von Mitchell (2002b) nur unter der Aufforderung, die Aufmerksamkeit in die Peripherie zu richten (bewegte Punktwolken zentral und peripher erkennen), Bestand haben. Eine solche Aufgabe wurde im vorliegenden Paradigma nicht gestellt. Es stand im Gegensatz zur einfachen Aufmerksamkeitsaufgabe eine semantische Zielstellung (Wortfindung) im Vordergrund. Des Weiteren sind die Ergebnisse von Mitchell (2002b) bezüglich der unterschiedlichen Charakteristika der Stimuli im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen differenziert zu betrachten. Mitchell (2002b) fand im dorsalen Pfad Aktivierungen auf bewegte, nicht-semantische Punktwolken. Die Probanden der vorliegenden Arbeit hatten dagegen eher komplexe, räumliche Informationen zu extrahieren. Zusammenfassend fand Mitchell (2002b) Aktivierungen und Veränderungen im dorsalen Pfad bei Gehörlosen, die im deutlichen Gegensatz zu den Ergebnissen stehen, da die hier untersuchte Gruppe der Gehörlosen keine dorsalen Aktivitäten zeigen. Diese Kontroverse könnte in unterschiedlichen Aufgabenstellungen, verschiedenem Stimulusmaterial und unterschiedlich definierten ROI begründet sein.

Eine weitere, interessante Studie in diesem Zusammenhang führten Soderfeldt et al. (1997) durch. Es wurden die Aktivierungen von bilingualen Personen (dies entspricht den hier untersuchten Gebärdensprachdolmetschern) auf vier verschiedene Kategorien (Gebärdensprache, gesprochene Sprache, gesprochene Sprache mit bedecktem Mund, gesprochene Sprache mit Ton und einem bewegungslosem Gesicht) getestet, welche mittels Videosequenzen dargeboten wurden. Die Probanden reagierten auf die Kategorie „gesprochene Sprache während der Darbietung eines bewegungslosen Gesichtes“ erwartungsgemäß mit Aktivierungen in den auditiven Feldern. Bei der Wahrnehmung von Gebärdensprach-Sequenzen zeigten sie allerdings nur Aktivierungen in den visuellen Assoziationskortex (hier: BA 37 und 19), waren aber nicht in ausgewählten, parietalen Regionen aktiv. Die Autoren schlussfolgerten, dass bilinguale Personen bei der Wahrnehmung von Gebärdensprache die visuelle Route (ventralen Pfad) benutzen (vgl. Soderfeldt et al., 1997). Vermutlich verarbeitet diese Personengruppe Gebärdensprache eher wie die Gruppe der Gehörlosen und unterscheidet sich vom Verarbeitungssystem der hörenden Probanden. Leider machten Soderfeldt et al. (1997) für die Gruppe der Gehörlosen keine Angaben zu Aktivierungen im parietalen Kortex bei der Wahrnehmung

von Gebärdensprache. Interpretiert man die gefundenen Ergebnisse im Sinne der ursprünglichen Vermutung, dass die Gebärdensprachdolmetscher und Gehörlosen tendenziell ähnliche Verarbeitungswege aufweisen, könnte man Parallelen zu den hier gefundenen Ergebnissen ziehen. Es fand sich zwar in der hier vorliegenden Studie parietale Aktivität bei der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ für die Dolmetscherguppe, diese fiel aber deutlich geringer aus, als die der beiden nicht-gebärdenden, hörenden Gruppen.

Es fanden sich in der vorliegenden Untersuchung für die Gehörlosen vernachlässigbare Aktivierungen im dorsalen Pfad, aber signifikante Aktivierungen für die Gebärdensprachdolmetscher. Andere Studien dagegen bewiesen Aktivitäten im dorsalen Pfad bei Gehörlosen (vgl. Mitchell, 2002b) und keine bei Dolmetschern in parietalen Regionen (vgl. Soderfeldt et al., 1997). Die Ursachen dieser unterschiedlichen Ergebnislage liegen vermutlich in unterschiedlichem Stimulusmaterial und Aufgabenstellungen.

15.1.1 Verbesserung visueller Fertigkeiten bei Gehörlosen und die Rolle des parietalen Kortex

In diesem Kapitel geht es um die Auswirkungen des Erwerbs einer visuell-motorischen Sprache bzw. der auditiven Deprivation auf visuelle Fertigkeiten, wobei das Hauptaugenmerk auf Veränderungen in bewegungsselektiven Arealen liegt. Elf Hörenden, elf Gehörlosen und acht hörenden Gebärdenden wurden in einer fMRT-Studie (T2*-gewichtete Aufnahme, 20 Schichten, 5mm Dicke, 10% Lücken) von Bavelier et al. (2001) bewegte und statische Punktringe unter verschiedenen Bedingungen von räumlicher Aufmerksamkeit dargeboten. Die unterschiedlichen Paradigmen zielten auf Aufmerksamkeitsselektivität bestimmter Merkmale (peripheres Sehen, Helligkeitsunterschiede, Geschwindigkeitsdiskriminierung) ab. Die Autoren verzeichneten bei peripherer Aufmerksamkeit eine stärkere Rekrutierung des bewegungsselektiven Areals MT von Seiten der Gehörlosen. Die Hörenden aktivierten dieses Areal dagegen stärker unter zentraler Aufmerksamkeit. Zum anderen fanden die Autoren eine gesteigerte Aktivierung des PPC bei Gehörlosen, wenn die Aufgabe das Erkennen von Bewegungen erforderte. Des Weiteren „driftete“ die Lateralisierung bei Gehörlosen und hörenden Gebärdenden in MT/MST (= Areale im dorsalen Pfad zur Bewegungsselektion) zur linken Hemisphäre. Das bedeutet, dass der Gebrauch der Gebärdensprache zu Veränderungen in den Arealen für Bewegungswahrnehmung führt. Zusammenfassend führte die

Verfeinerung folgender *visual skills* zu veränderter Bewegungsverarbeitung bei Gehörlosen: verbesserte periphere visuelle Aufmerksamkeit; veränderte Orientierungsmechanismen (durch auditive Deprivation) und veränderte Lateralisierung der Bewegungsverarbeitung (durch Erwerb der Gebärdensprache) (vgl. Bavelier et al., 2001). Diese Verbesserungen könnten erklären, warum den Gehörlosen keine Aktivierungen im dorsalen Pfad bei der Wahrnehmung von bewegungsinduzierenden Bildern nachgewiesen werden konnten. Die Gehörlosen sind vermutlich bei der visuellen Wahrnehmung von Bewegung durch die Verbesserung der visuellen Fertigkeiten den Hörenden gegenüber im Vorteil, und zeigen somit bei der Perzeption von relevanten Details keine Aktivierungen aufgrund der fehlenden Anstrengung.

In einer Studie von Neville & Darves (2004) zeigten die von ihnen untersuchten, kongenital Gehörlosen gegenüber einer hörenden Kontrollgruppe bei der Aufforderung, bewegte Lichtpunkte zu entdecken, eine deutliche Erhöhung der Aktivierung in Arealen des dorsalen Pfades, die nach Aussagen der Autoren für die Bewegungsdiskriminierung und Bewegungsdetektion zuständig sind. Somit wiesen sie bei Gehörlosen eine selektive Modifizierbarkeit der dorsalen Bahn nach, welche sich allerdings nicht auf die visuellen Verarbeitungsprozesse im ventralen Pfad übertragen lässt, und belegten eine modulierte Bewegungsverarbeitung bei auditiv Deprivierten (vgl. Neville & Darves, 2004).

Bavelier et al. fanden in einer im Jahre 2000 durchgeführten Studie neuronale Erklärungen für die verbesserte visuelle Aufmerksamkeit kongenitaler Gehörloser in der Peripherie. Die Autoren entdeckten bei den untersuchten Gehörlosen eine stärkere Konnektivität zwischen dem PPC und der Area MT/MST und eine stärkere Rekrutierung dieser bewegungsselektiven Areale als bei Hörenden, wenn sich die Aufgabe auf Bewegungserkennung im peripheren, visuellen Feld bezog. Folglich wird eine Veränderung in der Verbindung zwischen dem PPC und MT/MST als Ursache für die verbesserten visuellen Fähigkeiten bei Gehörlosen für wahrscheinlich gehalten. (vgl. Bavelier et al., 2000).

Die Studien von Neville & Darves (2004) und Bavelier et al. (2000) belegen Veränderungen in der Wahrnehmung von Bewegung bei Gehörlosen und eine damit einhergehende verstärkte Nutzung der dorsalen Areale. Unterschiede zwischen Hörenden und Gehörlosen bei der Perzeption von Bildern mit bewegungsrelevantem Inhalt kann durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt werden, allerdings zeigten die Gehörlosen keine Rekrutierung der dorsalen Areale PF und PG.

In einer Studie von Bosworth & Dobkins (1999) konnte des Weiteren festgestellt werden, dass zwar die Reaktionszeiten und Schwellen zwischen Hörenden und Gehörlosen bezüglich einer Bewegungsdiskriminierungsaufgabe vergleichbar waren, sich aber Unterschiede im visuellen Feld bei der Verarbeitung der Stimuli zeigten. Die Hörenden wiesen einen leichten „links-visuelles-Feld“-Vorteil bei der Erkennung von Stimuli im linken versus rechten Gesichtsfeld auf. In der Gruppe der Gehörlosen dagegen stießen die Autoren auf einen signifikanten „rechts-visuelles-Feld“-Vorteil. Sie schlussfolgerten, dass die linke Hemisphäre bei auditiv Deprivierten vermutlich auf Bewegungsverarbeitung spezialisiert ist (vgl. Bosworth & Dobkins, 1999).

In einer weiterführenden Studie von Bosworth & Dobkins (2002) wollten die Autoren eruieren, ob die gefundenen Ergebnisse durch die Gehörlosigkeit an sich, oder durch die Benutzung der Gebärdensprache hervorgerufen wurden. Zu diesem Zweck erhoben sie erneut Daten von Hörenden, Gehörlosen und Hörenden mit Gebärdensprachkenntnissen. Ihre Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass der „rechts-visuelles-Feld“-Vorteil durch die Erfahrung mit Gebärdensprache hervorgerufen wird. Die visuelle Feldasymmetrie für Bewegungsverarbeitung bei Gehörlosen resultiert folglich aus der Veränderung sensorischer Faktoren, und wird nicht beeinflusst durch Aufmerksamkeit (vgl. Bosworth & Dobkins, 2002a). Eine bei Gehörlosen festgestellte, verbesserte selektive Aufmerksamkeit führten die Autoren aufgrund der Ergebnislage eher auf die auditive Deprivation, als auf Gebärdenspracherfahrungen zurück (vgl. Bosworth & Dobkins, 2002b). Eine Verbesserung der Bewegungsverarbeitung resultiert somit aus der Benutzung von Gebärdensprache, Änderungen in der Aufmerksamkeit hingegen aus der auditiven Deprivation.

Alle bisher genannten Untersuchungen fanden Veränderungen im dorsalen Pfad bei Gehörlosen und belegen eine klare Plastizität im parietalen Kortex und eine deutliche Mehraktivierung aller zum dorsalen Pfad gehörenden Areale. Konträr dazu zeigten die hier untersuchten Gehörlosen im Gegensatz zu Hörenden und Gebärdensprachdolmetschern keine Aktivitäten in den untersuchten dorsalen Arealen. Somit stehen die Erkenntnisse der aktuellen Literatur durchaus konträr den Ergebnissen der Studie gegenüber. Neben verschiedenartigem Stimulusmaterial (bewegte versus statische Stimuli, inhaltliche versus symbolische Stimuli) könnten die Aufgabenstellungen eine plausible Ursache für diese unterschiedlichen Ergebnisse sein. Es fällt auf, dass alle Instruktionen der anderen Studien auf selektive bzw. periphere Aufmerksamkeit, Erkennen von Geschwindigkeiten von Bewegungsreizen oder Bewegungsdetektion abzielten. Keines der Paradigmen forderte den

gehörlosen Versuchspersonen Übersetzungs- bzw. Wortfindungsaufgaben ab. Eine Auseinandersetzung mit möglichen Erklärungsansätzen für das der Literatur entgegengesetzte Aktivierungsmuster bei den untersuchten Gruppen soll im nächsten Abschnitt stattfinden.

15.1.2 Diskussion der Aktivierungsmuster im SPC (= superiorer parietaler Kortex) bei Hörenden und Gehörlosen

Die drei hörenden Gruppen (K1, K2, D) zeigen bei der Kategorie mit den stärksten Bewegungsreizen „Gebärden mit Pfeil“ ein auffällig hohes Aktivierungsmuster im parietalen Kortex (= BA 7a, 7b) in der linken und rechten Hemisphäre (vgl. Tabellen 14.1 und 14.3). Die Reaktion der Gehörlosen auf die ihnen bekannte Kategorie ist dagegen gekennzeichnet vom Ausbleiben eben dieser parietalen Aktivierung. Es steht folglich die Frage zur Diskussion, warum die beiden Hauptgruppen (hörend versus gehörlos) auf die gleichen dargebotenen Stimulusinformationen unterschiedliche Aktivierungen zeigen. Die drei hörenden Gruppen reagierten also auf die visuellen Reize, die Bewegungen enthalten, mit Aktivierungen im dorsalen Pfad, der bei Hörenden für genau diese Form der Informationen zuständig ist (z. B. Handstellung, Zeigebewegungen, Winkel etc.). Warum aber weisen die hier untersuchten Gehörlosen dieses Aktivierungsmuster nicht auf?

Zunächst sei mithilfe der Abbildung 15.1 auf die in Abschnitt 12.4 bereits erwähnten und hier noch einmal explizit aufgeführten Merkmale hingewiesen. Diese Merkmale sind in der hier diskutierten Kategorie „Gebärden mit Pfeil“, aber auch zum Teil in den anderen bewegungsrelevanten Kategorien enthalten und können vermutlich als bewegungsrelevante Bestandteile über die dorsale Bahn extrahiert werden. Sie dienen der Veranschaulichung von Informationen, die von einem Bild der dargebotenen Kategorie vermutlich in der dorsalen Bahn verarbeitet werden.

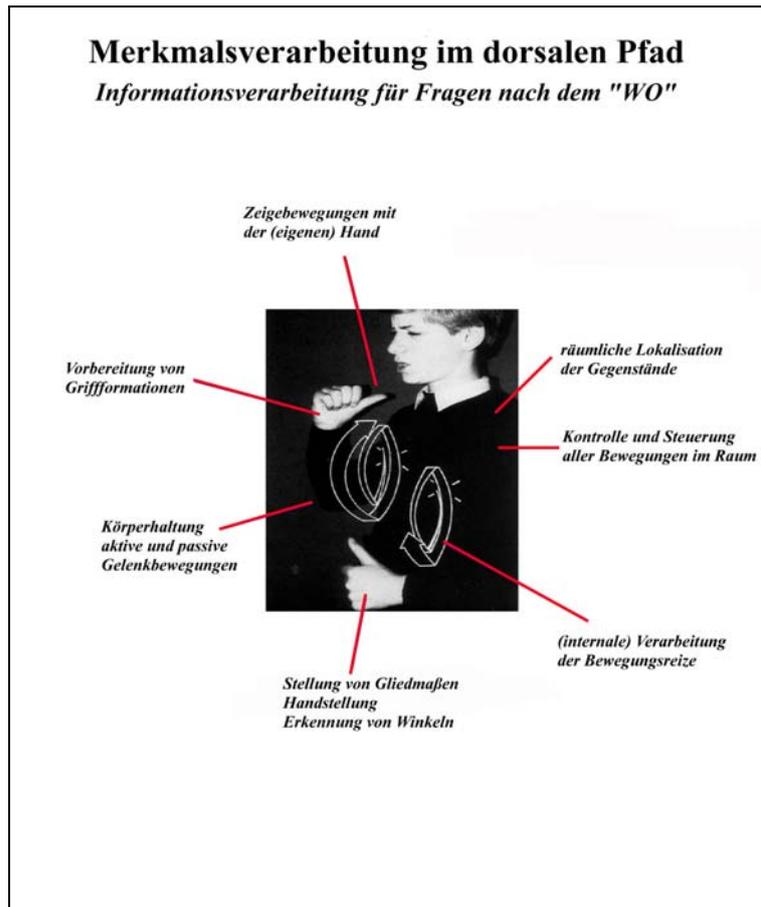


Abbildung 15.1: Darstellung aller bewegungsrelevanten Informationen in einem Bild der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“. Beispielbild für die Gebärde „Schmerz(en)“ (eigene Darstellung).

Es gibt möglicherweise zwei Erklärungsansätze für das Phänomen, dass die Gruppen K1, K2 und D im dorsalen Pfad Aktivierungen aufwiesen, wogegen die Gehörlosen keine Aktivierungen in den definierten Arealen zeigten. In den Ergebnissen der gegenwärtigen Literatur finden sich für diese Befunde keine vergleichbaren Parallelen. Neben den bereits erwähnten Unterschieden hinsichtlich der Stimuli und Aufgabenstellung werden folgende Vermutungen für die hier fehlenden Aktivierungen aufgestellt:

Erster Erklärungsansatz:

Aufgrund der fehlenden auditiven Modalität müssen sich Gehörlose stärker auf visuelle Informationen verlassen, um fehlende Informationen zu kompensieren und sich zu orientieren. Die Beobachtung des extra- und intrapersonalen Raumes gewinnt in diesem Zusammenhang an Bedeutung. Dieser Umstand kann in einer erhöhten Sensibilität für visuelle Orientierungsmechanismen resultieren. Der zusätzliche Umstand, dass sich

Gehörlose abrupt von einer auditiven Sprachverarbeitung auf eine visuell-motorische umstellen müssen oder auf die letztere Form von Geburt an angewiesen sind, könnte zu einer Veränderung in der Bewegungswahrnehmung und –verarbeitung führen. Vermutlich führt die auditive Deprivation im Sinne der Kompensation zur Verbesserung visueller Fertigkeiten. Außerdem sind die Gehörlosen in der Folge gezwungen, eine visualisierte Sprache zu erlernen, da ihnen die auditive verwehrt bleibt. Je besser die visuellen Fertigkeiten ausgeprägt sind, umso leichter gelingt die Wahrnehmung der einzelnen Komponenten der Gebärdensprache (Arme, Hände, Stellungen der Gliedmaßen), und die Vermutung, dass auch die Wahrnehmung des Raumes erleichtert wird, liegt nah. Die leichtere Analyse von z. B. Handbewegungen geht aus dem Gebrauch von Deutscher Gebärdensprache (DGS) sowie Lautsprachbegleitendem Gebärden (LBG) hervor (vgl. Bavelier et al., 2001). Sowohl die auditive Deprivation als auch der Gebrauch der Gebärdensprache könnten zu einer ständigen Verbesserung und Qualifizierung der visuellen Fertigkeiten führen (z. B. schnelleres peripheres Sehen; erhöhte selektive Aufmerksamkeit etc.), um Informationen im extrapersonalen Raum schneller zu entdecken (Gebärden anderer Menschen) und für das eigene Verständnis zu nutzen. Je besser diese Fertigkeiten entwickelt sind, umso schneller gelingt die Perzeption der räumlich-ausgeprägten Sprache. Aufgrund der in Abschnitt 15.1.1 aufgeführten Vorteile Gehörloser gegenüber Hörenden könnte es einer auditiv deprivierten Person vermutlich zügiger und ökonomischer gelingen, visuelle Reize in ihre relevanten Bestandteile zu zerlegen. Die Verbesserung visueller Fertigkeiten, wie z. B. schnellere Wahrnehmung von Bewegungen, bessere Orientierungsmechanismen und verbesserte periphere, visuelle Aufmerksamkeit, könnten bei der Darbietung der gezeigten, komplexen Gebärdenbilder zu einer problemloseren Wahrnehmung der notwendigen Informationen bei Gehörlosen und wegen der geringeren Anstrengung zu einer verringerten Aktivierung in den Arealen führen, die für das Erkennen der Informationen verantwortlich sind. Man könnte vermuten, dass die Gehörlosen die visuellen Fertigkeiten aufgrund des fehlenden, auditiven Input „trainieren“ bzw. verfeinern und ihnen somit die visuelle Wahrnehmung der komplexen Gebärdenbilder weniger Schwierigkeiten als Hörenden bereitet. Für die Gehörlosen kommt erleichternd hinzu, dass sie mit dem dargebotenen Bildmaterial vertraut sind, wogegen Hörenden diese Gebärdenbilder gänzlich neu waren. Zahlreiche Studien belegen, dass die Darbietung bekannter Reize zu deutlich weniger Aktivität führt, als unbekannte Stimuli. In einer Studie von Mechelli et al. (2003) wurden 20 Versuchspersonen normale Wörter versus Pseudowörter dargeboten. Es zeigte sich, dass die nichtlexikalischen Wörter eine

deutlich stärkere Aktivität in den Arealen hervorriefen, die eigentlich an das Erkennen von lexikalischem Inhalt gebunden sind (vgl. Mechelli et al., 2003). Die stärkere Anstrengung bei Pseudowörtern, die dem Aufwand zum Erkennen von unbekanntem Bildern bei der hörenden Gruppe entspricht, könnte die Ursache für die starke Aktivierung im SPC sein.

Die fehlenden Aktivierungen der Gehörlosen im SPC könnten als Ursachen sowohl die Bekanntheit der Gebärdenbilder als auch die geringere Anstrengung bei der Wahrnehmung der Stimuli haben. Zusammengefasst wird in diesem Erklärungsansatz vermutet, dass die Aktivierung der Hörenden und die fehlende Aktivierung der Gehörlosen im parietalen Kortex in den besseren visuellen Fertigkeiten der Gehörlosen begründet ist, und die Wahrnehmung der Kategorien für die auditiv Deprivierten somit deutlich erleichtert ist.

Zweiter Erklärungsansatz:

Eine weitere Erklärung für die Differenzen in den Aktivierungsmustern beider Versuchsgruppen könnten unterschiedliche Verarbeitungswege zwischen Hörenden und Gehörlosen sein. Recanzone, Schreiner und Merzenich (1993) vermuteten aufgrund von Experimenten mit Affen, dass sich Erfahrungen durch die Ausbreitung der Areale manifestieren, die sich der Aufgabe widmen (vgl. Recanzone et al., 1993). Das bedeutet, dass möglicherweise die Wahrnehmung alt-bekannter Stimuli zu einer Ausbreitung der Aktivitäten auf andere Areale führt, d. h. es wird ein anderer bzw. zusätzlicher Verarbeitungsweg benutzt. Vermutlich verarbeiten die Gehörlosen die Gebärden-Stimuli in Strukturen, die von Hörenden nicht benutzt werden, da diese keine Veranlassung haben, über andere Wege zu kompensieren bzw. keine Gebärdensprache erlernt haben. Es ist durchaus denkbar, dass die auditiv Deprivierten die dargebotenen Gebärdenbilder nicht über den dorsalen Pfad verarbeiten, obwohl die Stimuli auch für sie bewegungsrelevante Informationen enthalten. Im Gegensatz zu den Hörenden sind sie aber vermutlich in der Lage, die Bilder in ein entsprechendes Wort zu decodieren. Folglich könnten die Informationen über die Bewegungen nur dem Wortfindungsprozess dienen, und würden bei erfolgreicher Wortfindung sekundär. Der geforderten Aufgabenstellung folgend, zu den dargebotenen Bildern innerlich ein Wort zu verbalisieren, wäre es denkbar, dass die Gehörlosen die Stimuli vermutlich eher auf dem semantisch-lexikalischen Weg verarbeiten. Da sich einem hörenden Subjekt ohne Gebärdensprachkenntnisse die Wortbedeutung nicht erschließt, wird vermutlich versucht, das Bild in seine einzelnen Bestandteile zu zerlegen (Handstellung, Armhaltung, Pfeilrichtung etc.), um in der Folge

ein Wort zu vermuten. Die bewegungsrelevanten Informationen stehen lange Zeit im Vordergrund, und führen dadurch vermutlich zu den hier gefundenen Aktivierungen. An dieser Stelle sei darauf aufmerksam gemacht, dass sich das Ausmaß des Aktivierungsmusters der Dolmetscher zwischen dem der Hörenden und der Gehörlosen befindet. Sie zeigten z. B. auf die „Gebärden mit Pfeil“ eine höhere Aktivierung als alle gehörlosen Personen, aber eine deutlich geringere als die Hörenden. Es entspricht den Erwartungen, dass die Gebärdensprachdolmetscher bei der Verarbeitung von Gebärdenbildern vermutlich vergleichbare Verarbeitungsmuster wie die Gehörlosen zeigen, da sie mit dem Stimulusmaterial vertrauter waren als die Hörenden und die Gebärdensprache beherrschen. Andererseits haben Gebärdensprachdolmetscher weitaus geringere Praxiserfahrungen als Gehörlose und greifen damit vermutlich auch auf die Verarbeitungswege zurück, die den Hörenden vertraut sind. Dies sind plausible Begründungen für das Ergebnis, dass die Aktivierungen im parietalen Kortex auf die Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ bei der Gruppe der Gebärdensprachdolmetscher nicht so hoch ist, wie die der beiden hörenden Gruppen und dennoch höher als die der Gehörlosen. Beim Decodieren der Bilder ist es dieser Gruppe vermutlich möglich, das entsprechende Wort zu erkennen, sie benötigen allerdings wahrscheinlich aus Mangel an Erfahrung und ihrer normalerweise auditiven Sprachverarbeitung die Informationen zu Bewegungen (trotz Erlernen der visuell-motorischen Sprache), um den Prozess der Decodierung von Bild zu Wort erfolgreich abzuschließen. In diesem Erklärungsansatz wird mit gebührender Vorsicht postuliert, dass die Gehörlosen andere Strukturen zur Verarbeitung der Stimuli „Gebärden mit Pfeil“ benutzen, als die Hörenden, und aus diesem Grund keine Aktivierungen im dorsalen Pfad bei den auditiv Deprivierten zu sehen sind.

Die fehlende Übereinstimmung der in dieser Studie gefundenen Resultate mit den Ergebnissen der Untersuchungen zum dorsalen Pfad und Gehörlosen der gegenwärtigen Literatur kann, wie bereits angesprochen, folgende Ursachen haben: alle im Zusammenhang des dorsalen Pfades zitierten Studien arbeiteten mit anderem Stimulusmaterial als in dieser hier dargestellten Untersuchung. Es wurden fast ausschließlich bewegte Punkte oder Muster dargeboten, wohingegen hier statische Bilder präsentiert wurden. In den Studien wurden weder Bilder mit semantischem Inhalt gezeigt noch die Anweisung gegeben, ein Wort zu finden. Im Gegensatz dazu stand in der vorliegenden Untersuchung die Decodierung vom Bild zum passenden Wort im Vordergrund.

In einer Studie von Podzebenko, Egan und Watson (2002) wurden zehn gesunde Personen instruiert, Zeichen in Rotation sowohl zu beobachten als auch sich vorzustellen, und zu entscheiden, ob sie normal oder gespiegelt sind. Alle Personen zeigten starke Aktivierungen im dorsalen Pfad (vgl. Podzebenko et al., 2002). In dieser Studie lassen sich Parallelen zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung finden. Die Hörenden in der hier durchgeführten Untersuchung beobachteten ebenfalls andere Personen, bei denen die Richtung der auszuführenden Bewegungen zu erkennen war. Die Beobachtung von angedeuteter Bewegung (die Pfeile in den Bildern bahnten die Vorstellung von Bewegung an) und das innere Bestreben, die einzelnen Elemente zu imaginieren, um den Sinn des Bildes zu erschließen, könnte zur gefundenen Aktivität in den Arealen führen, die auch dann aktiviert gewesen wären, wenn die Versuchspersonen die Bewegungen selber aktiv ausgeführt hätten. Anhand der vorgestellten Studie von Podzebenko et al. (2002) kann zudem demonstriert werden, dass die Existenz von mirror neurons für die Aktivierungen der Hörenden im SPC verantwortlich sein könnte. Bei dieser speziellen Form von Neuronen wird vermutet, dass sie aktiviert werden, wenn eine Person einer anderen beim Ausführen von Bewegungen zuschaut und sich diese internal vorstellt. Die Aktivierungen sind dann in den Arealen zu finden, die auch dann aktiv wären, wenn die beobachtende Person die Bewegungen aktiv ausgeführt hätte.

Zusammenfassend kann vermutet werden, dass sich die Hörenden beim Betrachten der „Gebärden mit Pfeil“ die Bewegungen vorstellen und sie internal imitieren, wogegen Gehörlose die Wortfindung prozessieren, was die diametralen Aktivierungsmuster erklären könnte.

15.2 Diskussion zum ventralen Pfad

Bezüglich der Resultate in den Brodmann-Arealen 20, 36, 37 (= ventraler Pfad) wiesen alle vier Gruppen vergleichbare Aktivierungsmuster auf (vgl. Kapitel 14). Tendenziell zeigten die Probanden bei allen Kategorien Aktivierungen, in denen eine Objektdiskriminierung notwendig war. Abbildung 15.2 verdeutlicht die Bestandteile eines Bildes, die vordergründig im ventralen Pfad verarbeitet werden.

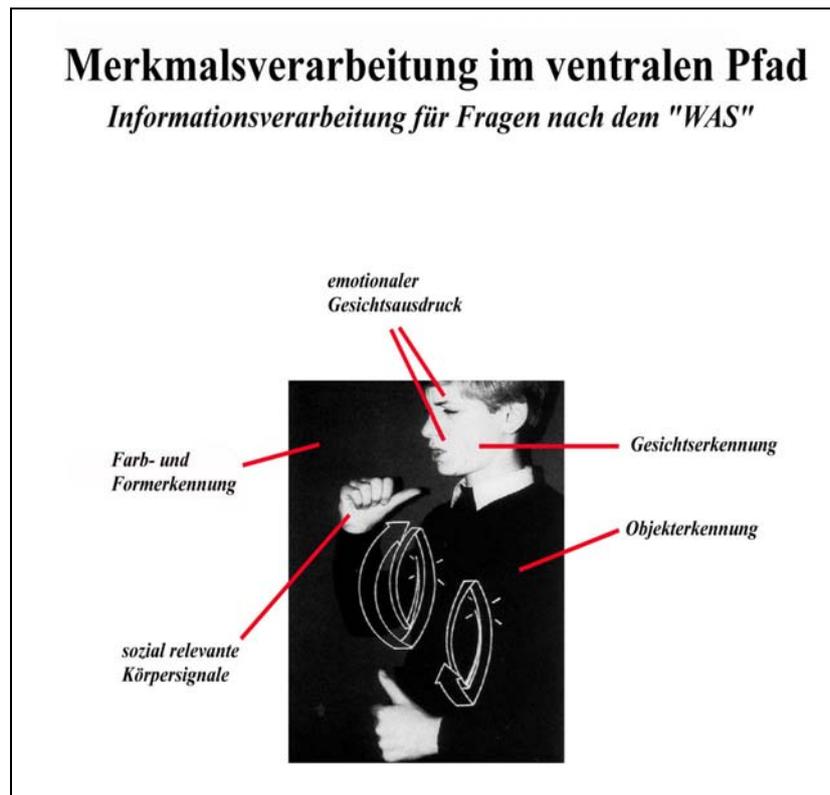


Abbildung 15.2: Darstellung aller relevanten Informationen in einem Bild der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“, die im ventralen Pfad verarbeitet werden. Beispielbild für die Gebärde „Schmerz(en)“ (eigene Darstellung).

Anmerkung: Die Verarbeitung "sozial relevanter Körpersignale" wird in der Literatur dem Sulcus temporalis superior (STS) zugeschrieben. In der gegenwärtigen Literatur ist noch nicht eindeutig geklärt, ob der STS Teil des ventralen oder des dorsalen Pfades ist. Ich betrachte den STS als einen Teil des dorsalen Pfades. Die Verarbeitung der Gesichtsausdrücke als ein Merkmal der sozial relevanten Körpersignale bleibt Aufgabe des ventralen Pfades (Gesichtsausdruck).

Die Ergebnisse zum ventralen Pfad gehen mit den Ergebnissen von Armstrong, Neville, Hillyard und Mitchell (2002) konform. Die Autoren fanden bei der Wahrnehmung von Farbstimuli keine Unterschiede zwischen hörenden und gehörlosen Gruppen in den Aktivierungen in den Arealen des ventralen Pfades und schlussfolgerten, dass der ventrale Pfad von der Gehörlosigkeit unbeeinflusst bleibt. Die in einer EEG-Studie evozierten Komponenten P1 und N1 wurden in ihrem Ausmaß vergleichbar zu den ERPs (event related potentials) bei den Hörenden gefunden (vgl. Armstrong, 2002). Die Autoren untersuchten dabei die Kontrast- und Helligkeitssensibilität von Hörenden und Gehörlosen. Diese beiden visuellen Funktionen sind sogenannte *low-level* Funktionen. Finney & Dobkins (2001) führten mit Gehörlosen, Hörenden und hörenden Gebärdenden Untersuchungen durch, um Aussagen zu diesen *low-level* visuellen Funktionen zu erhalten und zu eruieren, ob sich bereits bei den genannten visuellen Fertigkeiten, die schon auf einer sehr frühen Ebene ausgebildet sind, Unterschiede durch die Gehörlosigkeit

entwickeln. Alle drei Gruppen sahen bewegte Punkte mit einem vorher festgelegten Geschwindigkeitsbereich, bei denen Kontrastveränderungen bemerkt werden sollten. Die Ergebnisse lieferten bezüglich der Kontrastsensibilität keine Unterschiede zwischen den Gruppen (vgl. Finney & Dobkins, 2001). Somit führt die auditive Deprivation oder der Einsatz von Gebärdensprache auf dieser Ebene von visuellen Fertigkeiten nicht zu Differenzen zwischen hörenden und nicht-hörenden Personen.

In diesem Zusammenhang sei auf eine weitere Studie hingewiesen, welche die Plastizität des ventralen Pfades bei Gehörlosen im Gegensatz zu Hörenden untersuchte. In der fMRT-Studie von Mitchell (2002a) wurden hörenden und gehörlosen Probanden abwechselnd unbekannte Gesichter und gemischte Bilder dargeboten. Beide Gruppen zeigten typische Aktivierungen im ventralen Pfad. Mitchell (2002a) fand bei Gehörlosen allerdings Aktivierungen in zusätzlichen Gehirnregionen. Sie schlussfolgerte, dass die Gehörlosigkeit die Ursache für die benannte Veränderung war, obwohl Farb- und Formerkennung davon unbeeinflusst blieben (vgl. Mitchell, 2002a). Es bleibt also festzuhalten, dass grundlegende, visuelle Fertigkeiten unbeeinflusst von der auditiven Deprivation bleiben, sich die Aktivierung von Arealen zur Erkennung von Gesichtern allerdings bei Gehörlosen gegenüber Hörenden verändert (vgl. Mitchell, 2002a). Die Erkennung von bekannten und unbekanntem Gesichtern aktiviert den inferioren Teil des ventralen Pfades (Area TE und TEO bei Makaken; siehe Abbildung 12.1). Im Gegensatz zu Hörenden enthalten Gesichter für Gehörlose neben Identitäts- und Emotionsaspekten Informationen über linguistische Bedeutungen und grammatikalische Strukturen (vgl. Abschnitt 7.3). In dieser Untersuchung konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Koordinaten der Aktivierungen im ventralen Pfad nachgewiesen werden, was bedeutet, dass keine differierenden Areale im ventralen Pfad zur Gesichtserkennung zwischen Gehörlosen und Hörenden zu finden waren. Allerdings müssten zum Nachweis unterschiedlicher Gesichtserkennungsareale und zur weiteren Vertiefung der Fragestellungen weiterführende Studien durchgeführt werden, in denen die Aufmerksamkeit gezielt auf die Gesichter gelenkt (Aufgabenstellung zum Erkennen von Unterschieden formulieren), und bei denen mit weniger Kategorien von Gesichtern und deren unterschiedlichen Inhalten gearbeitet wird. So könnte man z. B. neutrale und positiv/negativ erregende Gesichtsausdrücke darbieten sowie Gesichtsausdrücke, die eine semantische Relevanz besitzen und solche, die inhaltlich irrelevant sind.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die hier gefundenen Ergebnisse zu den Aktivierungen im ventralen Pfad keine Unterschiede zwischen K2 und D erbrachten.

Dagegen war eine Überlegenheit der Aktivierungen von K1 gegenüber den Gehörlosen zu verzeichnen. Allerdings zeigten beide Gruppen vergleichbare Aktivierungen gegen Baseline.

15.3 Diskussion von Besonderheiten in den Aktivierungsmustern

Folgende Besonderheiten der Aktivierungen wurden in den Ergebnissen zum dorsalen und ventralen Pfad gefunden und sollen hier gesondert betrachtet werden:

- Gruppe K1 wies Aktivierungen im ventralen Pfad für die Kategorie „Wort“ auf
- Es fanden sich Aktivierungen außerhalb der bewegungsinduzierenden Kategorie „Gebärden mit Pfeil“ bei allen hörenden Gruppen

15.3.1 Ventrale Aktivität bei der Verarbeitung der Kategorie „Wort“

Die Kontrollgruppe 1 wies in der Kategorie „Wörter“ signifikante Aktivierungen im ventralen Pfad auf. Der ventrale Pfad dient eigentlich, wie bereits genannt, der Erkennung von Objekten. Für die Aktivierung bei einer Kategorie, in der nicht klassisch ein Objekt erkannt werden muss, gibt es folgende, mögliche Erklärung: von dem Areal V4, welches ein Teil des ventralen Pfades ist, wurden Verbindungen zum Gyrus angularis der linken Hirnhälfte gefunden. Der Gyrus angularis spielt beim Vorgang des Lesens eine entscheidende Rolle (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003). Die Verbindung beider Hirnareale könnte die Aktivierungen im ventralen Pfad beim Lesen eines Wortes erklären. Die Kontrollgruppe 2 sowie die Gebärdensprachdolmetscher und Gehörlosen müssten erwartungsgemäß ebenfalls Aktivierungen für die Kategorie „Wörter“ zeigen, da auch sie das Lesen prozessieren. Vermutlich lagen diese Aktivierungen unter dem festgelegten Signifikanzniveau.

15.3.2 Aktivierungen im dorsalen Pfad außerhalb der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“

Obwohl die anderen Kategorien keine Pfeile enthalten, zeigen die hörenden Gruppen Aktivierungen im SPC. Als möglicher Erklärungsansatz wäre anzuführen, dass auch in diesen Kategorien relativ viele Komponenten von Bewegungen enthalten sind, die zur Nachahmung animieren, z. B. Handstellung oder die Haltung der Arme zueinander. Die

hörenden Gruppen Kontrollgruppe 1 und 2 gaben bei Nachfragen durch den Versuchsleiter häufig Wörter an, die sie in die Bilder hineininterpretiert hatten. Die erfolgreiche Wortfindung (auch, wenn das gefundene Wort falsch ist) aus einem bis dahin unbekanntem Bild könnte ein Indiz dafür sein, dass die hörende Person versucht hat, Hand- oder Armstellung bzw. die Körperhaltung innerlich nachzuahmen, auch wenn keine Pfeile die Richtung andeuteten. Die Extraktion der Haltung und Stellung der Gliedmaßen ermöglicht die Vorstellung einer eigenen Körperhaltung (Nachahmung der Körperhaltung der gesehenen Person auf dem Bild) und damit den Rückschluss auf ein mögliches Wort. Über die Bewegungsvorstellung entsteht eine beschreibbare Situation, die dann in ein Wort oder eine Wortgruppe umgewandelt werden könnte. Diese Decodierung von einem Bild in ein Wort sieht man möglicherweise als Aktivierungen im dorsalen Pfad. Die Aktivierungen wären dann ein Indiz für die internale Imagination der Körper-Hand-Arm-Stellung, um ein Wort zuzuordnen zu können.

16 Grundlagen des Motorik-Paradigmas

16.1 Plastizität des primärmotorischen Kortex (M1) und dessen Veränderungen aufgrund alternierender Bedingungen

Jedes Körperteil wird auf dem Kortex sowohl sensorisch als auch motorisch repräsentiert. Der primärmotorische (= M1) und der primärsensorische Kortex (= S1) stellen Repräsentationsareale dar. Beide Areale sind somatotop gegliedert, wie in vielen Studien gezeigt wurde (z. B. vgl. Colebatch, Deiber, Passingham, Friston & Frackowiak, 1991). Diese Studien lehnten sich dabei an die Untersuchungsergebnisse von Penfield & Rasmussen (1950) an, die eine genaue Gliederung (Somatotopie) von M1 und S1 in einzelne funktionelle Areale zeigten (vgl. Penfield & Rasmussen, 1950). Die einzelnen funktionellen Areale sind für die Verarbeitung der Informationen von bestimmten Körperteilen verantwortlich; eine 'Karte' dieser kortikalen Repräsentationen ist der sogenannte *Homunculus* (siehe Abbildung 16.1).

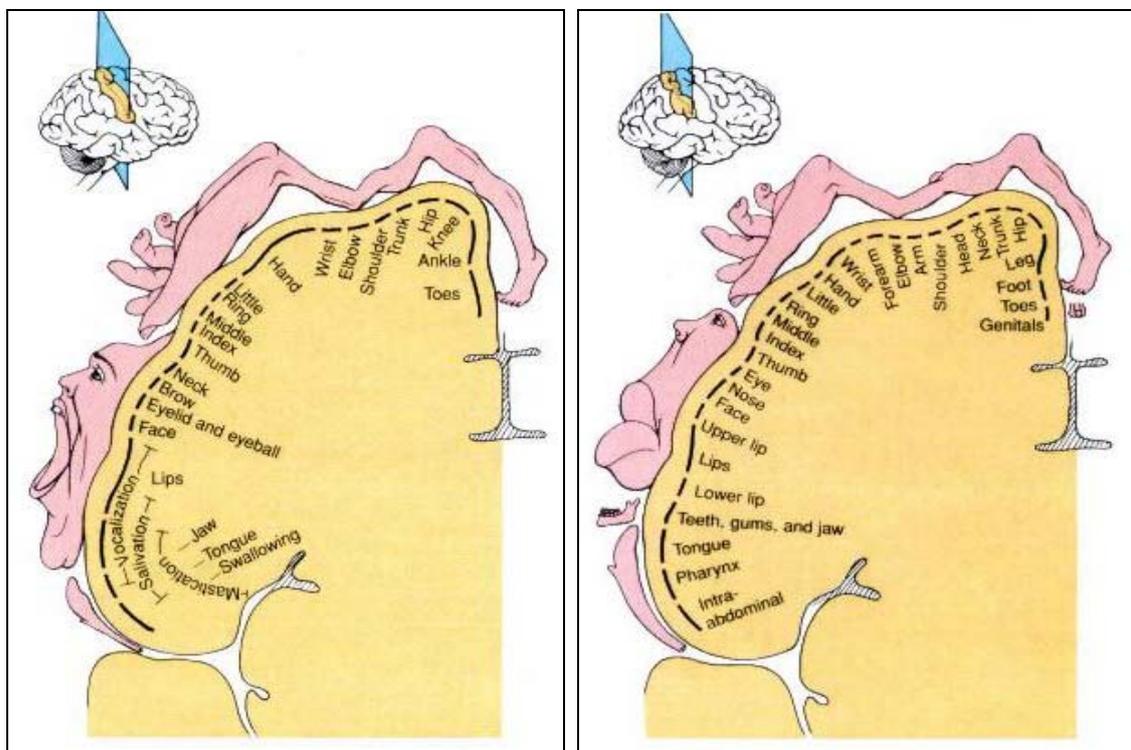


Abbildung 16.1: linke Ansicht: Somatotopie des motorischen Kortex in der rechten zerebralen Hemisphäre; rechte Ansicht: Somatotopie des somatosensorischen Kortex in der rechten zerebralen Hemisphäre (Quelle: in Anlehnung an Penfield & Rasmussen, 1950; Abbildung aus: Love & Webb, S. 19, 1992)

Die kortikale Repräsentation der Körperteile steht dabei nicht in direkter Größenrelation zu den entsprechenden Körperteilen. Für die Repräsentation der Körperteile in M1 wird vermutet, dass die Größe der kortikalen Repräsentation in einer Beziehung zu der für das entsprechenden Körperteil benötigten Präzision der Muskelkontrolle steht (vgl. Love & Webb, 1992). Die relativ ausgedehnten Bereiche für Finger, Mund, Zunge und Lippen sprechen für diese Annahme (vgl. Penfield & Rasmussen, 1950). Neueren Untersuchungen zufolge wird allerdings die Ansicht von Penfield & Rasmussen (1950) bezüglich des primärmotorischen Kortex, dass kleine Areale des M1 jeweils bestimmten Muskelgruppen des Körpers zugeordnet sind, in Frage gestellt. In einer Studie von Graziano, Taylor und Moore (2002) wurden 324 Orte in der motorischen Rinde von Affen mittels Mikroelektroden stimuliert. Die Ergebnisse zeigten nicht die erwarteten Muskelzuckungen nach Stimulation, sondern komplex-evozierte Bewegungen (z. B. das Ballen der Hand zur Faust und das Hinführen der Faust zum Mund). Diese Ergebnisse veranlassten die Autoren zu vermuten, dass einzelne Nervenzellen im Kortex (hier: M1) nicht einfach einen bestimmten Muskel ansprechen, sondern dass sie kleine, fertige Programme für differenzierte Bewegungsabläufe des Körpers beinhalten (vgl. Graziano et al., 2002). Es liegt die Vermutung nahe, dass sich bei Veränderung der äußeren Bedingungen (z. B. Amputation einer Hand oder starke Mehrbenutzung von Gliedmaßen) und der damit einhergehenden Veränderung von Bewegungsabläufen ebenfalls die Strukturen bzw. Repräsentationen in M1 verändern könnten.

Inzwischen ist eindeutig nachgewiesen worden, dass die Somatotopie des M1 und S1 nicht starr in ihrer Organisation ist, sondern mit Veränderungen in der Repräsentation von Körperarealen auf Anforderungen aus der Umwelt reagiert. Die Auffassung, dass die neuronale Struktur des Gehirns statisch sei, konnte widerlegt werden und stattdessen bewiesen werden, dass sich die neuronale Organisation fortdauernd aufgrund modifizierter Anforderungen an das Individuum verändern kann. Zum einen kommt es durch erhöhte Leistungsanforderungen und Erfahrungen (z. B. Klavier spielen) zur Ausdehnung der Repräsentation des entsprechenden Areals in M1. Zum anderen führen Verletzungen oder Amputationen und der damit einhergehende Verlust von motorischem und sensorischem Input zur Verringerung der Repräsentationen (vgl. Miltner & Weiss, 1999). Die lebenslange Fähigkeit, sich an umgebungsbedingte Bedürfnisse anzupassen, und die dann stattfindenden Veränderungen basieren auf der Fähigkeit des ZNS zu plastischen Veränderungen (vgl. Pantev, Engelien, Candia & Elbert, 2001).

16.1.1 Veränderungen der Repräsentationsareale von Körperregionen am Beispiel von Geigern, Pianisten, Braille-Lesern und Verletzten

Veränderte, externe Kontextbedingungen können die Ursache für Veränderungen der Repräsentation einzelner Körperregionen sein. Veränderte Erfahrungen, Mehrgebrauch von Extremitäten sowie Verletzungen und Verlust von Körperteilen zählen zu solchen veränderten externen Kontextbedingungen. Pianisten, Geiger, Braille-Leser und Verletzte sind Beispiele für Personen, bei denen kortikale Reorganisationsprozesse in M1 bzw. S1 stattfinden, da es aufgrund veränderter externer Bedingungen zu Veränderungen in Motorik und Sensorik kommt.

In einer Studie von Elbert et al. (1995) konnten bei *Berufsgeigern* Veränderungen der kortikalen Repräsentation der instrumentführenden Finger in S1 nachgewiesen werden. In der MEG-Untersuchung mit anschließender Quellenanalyse wurden neun Musiker versus sechs nichtmusikalische Kontrollen getestet, indem allen pneumatische Reize auf die Fingerspitzen von D1 und D5 beider Hände appliziert wurden (Nomenklatur der Finger: D1=Daumen; D2=Zeigefinger; D3=Mittelfinger; D4=Ringfinger; D5=Kleiner Finger). Die taktile Stimulation zeigte, dass sich für die Musiker das Zentrum der kortikalen Antwort für die linke Hand vergrößerte und topografisch zu der Region bewegte, die vorher die Handfläche repräsentierte. Die Fingerrepräsentation der linken Hand war nachgewiesenermaßen größer als bei der Kontrollgruppe, was die Annahme untermauert, dass die Repräsentation der Finger in S1 von Nutzung bzw. Gebrauch (durch veränderte Erfahrungen) abhängig ist. Für die Finger der rechten Hand, die lediglich den Bogen führt, konnten keine Effekte nachgewiesen werden. Da des Weiteren ein Zusammenhang zwischen Ausmaß der kortikalen Reorganisation und der Übungsdauer in Jahren bewiesen werden konnte, sprechen die Ergebnisse für eine nutzungsbedingte Vergrößerung des kortikalen Territoriums der linken Hand durch permanente taktile Reizung der linken Fingerspitzen (vgl. Elbert et al., 1995). Diese These wird unterstützt durch eine Studie von Kim et al. (2004), die eine geordnete Reorganisation des somatosensorischen und motorischen Kortex bei Personen, die ein Saiteninstrument erlernten, nachweisen konnten. In der fMRT- und TMS-gekoppelten Studie wurden Werte vor und nach sechs Monaten Instrumenterfahrung erhoben. Das durchgeführte Paradigma beinhaltete einen motorischen Teil, bei dem D5 abduziert bzw. adduziert werden sollte, sowie eine sensorische Stimulation von D5 durch eine Saite. Die Messungen ergaben nach Übung neue, motorische Repräsentationsareale für den linken kleinen Finger im SMA, sowie größere Aktivierungen im sensorischen Kortex für diesen Finger (vgl. Kim et al., 2004). Diese

Vergrößerung der Repräsentation des Kleinen Fingers nach Instrumenterfahrung spricht ebenfalls für eine nutzungsbedingte Vergrößerung.

Bei erfahrenen *Klavierspielern* konnte nachgewiesen werden, dass die starke Mehrnutzung ihrer Finger ebenfalls zu einer Vergrößerung der Handareale im S1 führt. Sforza, Macri, Turci, Grassi und Ferrario (2003) postulierten, dass die Fähigkeit des Klavierspiels natürliche Hand- und Fingerbewegungen in einem komplexen Muster verbindet. Die Arbeitsgruppe fand durch Analysen von Bewegungstrajektoren Veränderungen in den neuromuskulären Mustern der Fingerbewegungen. Diese waren unabhängig vom Alter und der Professionalität des Klavierspielers und zeigten sich schon bei geringen Erfahrungen am Klavier (vgl. Sforza et al., 2003). Die stattgefundenen Veränderungen könnten folglich durch die überdurchschnittliche Nutzungshäufigkeit der Finger erklärt werden. Pantev et al. (2001) wiesen plastische Veränderungen bei professionellen Pianisten und Streichern in S1 mittels fMRT nach und führten dies auf die hochfrequente Fingernutzung und Stimulation der Fingerkuppen zurück. Diese Auswirkungen auf die funktionelle Organisation des somatosensorischen Repräsentationskortex konnten nicht für die Hand nachgewiesen werden, die nicht in die Instrumentenbenutzung involviert war (vgl. Pantev et al. 2001).

Blinde Braille-Leser (Leser von erhabener Blindenschrift), welche die visuelle Deprivation durch Nutzung u. a. taktiler Reize kompensieren müssen, stimulieren durch das Lesen der Braille-Schrift ihre Fingerkuppen ebenfalls sensorisch. Wie eine Studie von Sterr et al. (1998a) zeigte, fanden sich auch bei dieser Personengruppe vergrößerte kortikale Repräsentationszonen der „lesenden“ Finger im somatosensorischen Kortex (vgl. Sterr et al., 1998a). Da von den Probanden im Alltag mehrere Finger gleichzeitig zum Braille-Lesen eingesetzt wurden, konnten die Autoren mittels MEG ebenfalls Veränderungen in der somatosensorischen Topografie der Finger feststellen. Die kortikale, somatosensorische Repräsentation der Finger war topografisch nicht eindeutig trennbar und applizierte taktile Reize einzelner Fingerkuppen wurden von den Blinden häufig falsch wahrgenommen (vgl. Sterr et al., 1998b). Wie bereits erwähnt, werden die Finger von Blinden vordergründig haptisch beansprucht (versus rein motorischer Beanspruchung). Die Arbeitsgruppe von Rockstroh, Vanni, Elbert und Hari (1998) stimulierte die linken Fingerkuppen von Sehenden durch intensives Braille-Training. Im MRT zeigte sich im Anschluss eine veränderte somatosensorische Repräsentation der linken Hand. Der Schwerpunkt der Repräsentation von D5 (links) bewegte sich nach dem Training im Areal 3 b entlang des Sulcus centralis nach medial. Somit konnte die Vergrößerung des

Handareals durch ansteigende Stimulation bzw. vermehrten Gebrauch belegt werden (vgl. Rockstroh et al., 1998). Von größerem Interesse ist die Studie von Pascual-Leone und Torres (1993), die sich als erste Forschungsgruppe dem primärmotorischen Kortex bei blinden Braille-Lesern zuwandten und durch TMS eine vergrößerte motorische Repräsentation der involvierten Finger demonstrierten (vgl. Pascual-Leone & Torres, 1993). Auch Theoret, Merabet und Pascual-Leone (2004) wiesen ein größeres Areal des M1 für die Repräsentation des Braille-lesenden Fingers bei blinden Braille-Lesern nach (vgl. Theoret et al., 2004).

Die letzte hier aufgeführte Personengruppe, die sich zur Veranschaulichung der Veränderungen von kortikaler Repräsentation bestimmter Körperregionen eignet, ist die Gruppe der *Verletzten* bzw. *Amputierten*. So führt die Amputation eines Körperteiles zu massiver, kortikaler Reorganisation in S1 und M1. In einer Einzelfallanalyse von Weiss et al. (2000) fehlten einem männlichen Probanden D3 und D4 der rechten Hand. Unter Anwendung der Messmethode MEG und anschließender Quellenanalyse konnten Weiss et al. (2000) belegen, dass die Dipole von D2 und D5 der rechten Hand bereits zehn Tage nach dem Unfall enger beieinander lagen, als die analogen Dipole der linken Hand. Dadurch waren die Dipole der rechten Hand, die vorher D1 und D2 präsentierten, nach der Amputation signifikant weiter voneinander entfernt, als die Dipole von Daumen und Zeigefinger der unbetreffenen Hand. Die Ergebnisse beziehen sich auf kortikale Veränderungen in S1 durch Amputation und verdeutlichen, dass die neuronalen Zellverbände, welche vorher die nun amputierten Finger repräsentiert hatten, sich nach dem Vorfall reorganisieren und durch die benachbarten Zellverbände von D2 und D5 infiltriert werden. Das bedeutet, dass sich die Repräsentationsareale von D2 und D5 aufgrund mangelnden Inputs an D3 und D4 in diese ausbreiten und die neuronalen Zellverbände der deprivierten Areale in ihre Reizverarbeitung involvieren konnten (vgl. Weiss et al., 2000). Veränderungen im somatosensorischen sowie somatomotorischen Kortex fanden Weiss, Miltner, Liepert, Meissner und Taub (2004) auch nach pharmakologischer Nervenblockade des radialen und medialen Nervs der Hand bei neun gesunden Probanden. Die anschließende MEG-Analyse zeigte einen engeren Abstand zwischen den zur deafferenzierten Region benachbarten Bereichen und eine kortikale Ausbreitung dieser nicht-betroffenen Anteile über das blockierte Areal (vgl. Weiss et al., 2004). Magnetoencephalografie (= MEG) erfasst die Aktivität des Gehirnes, indem es elektromagnetische Felder misst. Dies ist möglich, da jeder Stromfluss, der ein Potential erzeugt (dieses ist mit EEG ableitbar) ein dazu orthogonal-stehendes Magnetfeld erzeugt.

Eine Studie von Cohen et al. (1991a) zeigte im Zusammenhang von Weiss et al. (2004) ebenfalls, dass Amputationen Veränderungen sowohl in S1 als auch in M1 hervorrufen können. Sie untersuchten MEP (motorisch evozierte Potentiale) unter TMS bei Patienten, deren obere Extremität amputiert war. Transkranielle Magnetstimulation (= TMS) ist eine neurophysiologische Methode, mit der kortikale Neuronen durch ein von außen induziertes Magnetfeld in ihrer elektrischen Aktivität beeinflusst werden. Die Autoren zeigten, dass die Amputation zu plastischer Reorganisation der topografischen Karten in M1 führen kann (vgl. Cohen et al., 1991a). Die gleiche Arbeitsgruppe bewies an diesen Patienten durch abgeleitete MEP, dass Amputation zu kortikaler und spinaler Reorganisation in erwachsenen, motorischen Strukturen führt (vgl. Cohen, Bandinelli, Findley & Hallett, 1991b).

Zusammenfassend illustrieren die vier Beispielgruppen der Geiger, Pianisten, Braille-Lesern und Verletzten sehr anschaulich eine Reihe der Basisprinzipien der kortikalen Reorganisation. Zum einen wird das Prinzip „*practice makes perfect*“ durch die Geiger, Pianisten und Braille-Leser verdeutlicht, welches beinhaltet, dass die erhöhte Stimulation (durch verstärktes Üben) eines Körperteiles dessen kortikale Repräsentationszone vergrößert. Zum anderen demonstriert die Gruppe der Verletzten/Amputierten/Nicht-Übenden das Prinzip „*use it or lose it*“. Das bedeutet, dass das Ausbleiben oder der komplette Verlust von afferentem Input zu einer Ausbreitung benachbarter Repräsentationszonen führt. Die benachbarten Bereiche vergrößern sich, wogegen sich die deafferenzierten Areale verkleinern. Dieses Prinzip trifft auch auf Personen zu, die eine Fertigkeit nach einer langen Phase des Übens nicht mehr (aus)üben (vgl. Elbert & Rockstroh, 2004).

16.1.2 Plastische Veränderungen bei Stroke-Patienten durch die *Constraint-induced movement therapy (CIMT)* und ihre Gemeinsamkeiten zu gebärdenden Gehörlosen

Ein weiteres Beispiel für die Fähigkeit des Gehirnes zur Reorganisation als Konsequenz auf Veränderungen sind Schlaganfall-Patienten, die nach Schlaganfall und damit einhergehenden Bewegungseinschränkungen an einem motorischen Rehabilitationsprogramm teilgenommen haben (hier: CIMT). Diese Taubsche Bewegungsinduktionstherapie (=CIMT) beruht auf einem Mehrgebrauch (nach Nichtgebrauch) der betroffenen Hand über mehrere Stunden am Tag, u. a. durch

Unterdrückung des Gebrauches der gesunden Hand (vgl. Bauder, Taub & Miltner, 2001). Zahlreiche Studien konnten anhand neurophysiologischer Messungen nachweisen, dass CIMT in einer Reorganisation des Gehirnes resultiert, die mit Verbesserungen der motorischen Aktivitäten einhergeht (vgl. Taub & Uswatte, 2003; Elbert, Rockstroh, Bulach & Meinzer, 2003; Sterr et al., 2002). Liepert et al. (1998) und Liepert, Bauder, Miltner, Taub und Weiller (2000) demonstrierten die Reorganisationsprozesse im motorischen Kortex unter Nutzung von TMS und bewiesen, dass sich die Repräsentationsareale von Muskeln, die trainiert wurden, vergrößert hatten. Beispielsweise hatte sich das Ausmaß des aktivierten, motorischen Kortexareals, das die Aktivität in den Handmuskeln generierte, in der Post-Messung (2. Messzeitpunkt nach der CIMT) gegenüber der Prä-Messung (1. Messzeitpunkt vor der CIMT) erhöht. Reduzierte, motorische Repräsentationsareale von betroffenen Körperteilen bei Stroke-Patienten hatten sich nach der Therapie vergrößert (vgl. Liepert et al., 1998, 2000). Carey et al. (2002) unterzogen zehn Schlaganfall-Patienten einem intensiven Fingertracking-Training (Nachfolgen von visualisierten Bewegungssequenzen auf einem Blatt Papier mit dem Finger) und verglichen diese Gruppe mit Schlaganfall-Patienten ohne Bewegungsaufgabe. Die fMRT-Messung zeigte vorrangig Veränderungen in M1. Zur Prä-Messung zeigten beide Gruppen eine dominante, ipsilaterale Aktivierung für die untersuchte Hand. Die Aktivierungen der Trainingsgruppe bewegten sich dagegen in der Post-Messung von der ipsilateralen zur kontralateralen Hemisphäre (vgl. Carey et al., 2002).

Die benutzungsabhängige, kortikale Reorganisation in M1 wurde bei den Schlaganfall-Patienten durch repetitives und massives Finger-, Hand- und Armtraining erzielt. Im Gegensatz zu den Berufsgeigern und –pianisten setzen Schlaganfall-Patienten ihre Hände durch einen Pathomechanismus bedingt nach einer Phase des temporären Nicht-Gebrauchs verstärkt ein. Außerdem führen sie motorische Handlungen mit den oberen Extremitäten aus und werden nicht vordergründig durch taktile Reize sensorisch stimuliert. Aus diesen Gründen dienten die Ergebnisse zu plastischen Veränderungen an Schlaganfall-Patienten als Grundlage zu der vorliegenden Untersuchung mit Gehörlosen. Die hier untersuchten Gehörlosen waren von Geburt an auditiv depriviert und mussten aus diesem Grund eine andere Strategie zum „Sprechen“ entwickeln als Hörende. Gehörlose erlernen und gebrauchen die Gebärdensprache als Kommunikationsmittel. Diese Möglichkeit der Kommunikation verlangt den Gebrauch der Hände, Finger und Arme. Sowohl Gehörlose als auch Gebärdensprachdolmetscher führen somit mit ihren oberen Extremitäten eine Vielzahl motorischer Handlungen aus. Die untersuchten kongenitalen Gehörlosen setzen

ihre Hände zwar nicht nach verletzungsbedingtem Nicht-Gebrauch ein, tun dies aber ebenso wie die Stroke-Patienten während ihrer Therapie weitaus häufiger als Gesunde. Der verstärkte Einsatz der Hände kommt folglich der Gruppe der Schlaganfall-Patienten und deren Gebrauch der Hände sehr nah. Diese Zunahme der Nutzungshäufigkeit im Sinne von veränderten, externen Kontextbedingungen kann zu den bisher oft zitierten plastischen Veränderungen im primärmotorischen Kortex bzw. kortikalen Reorganisationsprozessen im somatosensorischen Kortex führen. Deshalb wird Folgendes postuliert:

Die überdurchschnittlich häufige Nutzung der oberen Extremitäten bei Gehörlosen zeigt sich in einer Reorganisation der Nervenetze im motorischen Kortex. Folglich wird erwartet, dass die Repräsentationsareale der Hände durch die Ausübung der Gebärdensprache im Vergleich zu nicht-gebärdenden Hörenden signifikant vergrößert sind.

Da im alltäglichen Umgang mit Gebärdensprache eher der motorische Akt anstelle von sensorischer Stimulation im Vordergrund steht, wurde sich in der vorliegenden Studie auf plastische Veränderungen in M1 beschränkt. Zur besseren Abgrenzung der Körperareale in M1 wurde der Fokus zur Darstellung der kortikalen Reorganisation durch den verstärkten Gebrauch der oberen Extremitäten auf das Handareal gelenkt.

16.1.3 Deutliche Dissoziationen in den Befunden zur Somatotopie der Hände und Finger im primärmotorischen Kortex

Zur Verdeutlichung der Vergrößerung der Handareale bei Gehörlosen sollen mithilfe von fMRT die Repräsentationsareale der linken und rechten Hand dargestellt werden. Voraussetzungen für die Messung der Größe der Repräsentationsareale sind die somatotopie Untergliederung der einzelnen Finger bzw. die Bestimmung des Umfangs der Aktivierungen. Um Aussagen über die Größe der Repräsentation der Hand in M1 machen zu können, müssen die signifikanten Schwerpunkte der Aktivierungen von Daumen und Kleinem Finger (die beiden äußersten Punkte einer Hand) erhoben werden. Zur Klärung, ob sich das tägliche Ausüben von Gebärdensprache über mehrere Stunden auf die Größe der Handrepräsentation auswirkt, sollen die Daten mit altersparallelierten, nicht-gebärdenden Personen verglichen werden. Eine in diesem Zusammenhang gewünschte klare, somatotopie Trennung aller Finger in M1 scheint schwierig. Obwohl sich inzwischen

eine grobe Somatotopie der Bewegungsrepräsentationen für große Körperteile etabliert hat, ist der Grad der Feinskalierung speziell für die Handregion in der Literatur umstritten. Beisteiner et al. (2001) sind z. B. Vertreter der Theorie, dass die Finger in M1 nach der Somatotopie von Penfield & Rasmussen (1950) geordnet sind. Bei ihrer Untersuchung von 26 Probanden im fMRT während der Ausführung von Bewegungen mit allen Fingern wurden Schwerpunkte der aktivierten Cluster aller Finger mittels T-Tests verglichen. Die Ergebnisse zeigten eine hochsignifikante somatotope Gliederung der fingerspezifischen Aktivierungsmuster, wie es schon Penfield & Rasmussen (1950) postuliert hatten (vgl. Beisteiner et al., 2001). Indovina & Sanes (2001) unterstützen dagegen die Theorie, dass die Aktivierungsmuster der Finger in M1 größtenteils überlappend sind. Bei der Untersuchung von gesunden Rechtshändern, die eine repetitive Extensions-Flexions-Bewegung der Finger D1, D2 und D3 ausführten, erwies sich die statistische Absicherung für ein Homunculus-Muster als zu schwach und die Abstände zwischen den Fingern als zu gering (vgl. Indovina & Sanes, 2001). Die Entstehung unterschiedlicher Ansichten zur Somatotopie wird in der aktuelleren Literatur von Dechent & Frahm (2003) auf Beschränkungen in der Aufnahmetechnik zurückgeführt. Die Autoren konnten durch eine fMRT-Aufnahme bei sieben Gesunden mit hoher räumlicher Auflösung ($0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$) sowohl überlappende, als auch somatotop getrennte Repräsentationsareale der Finger nachweisen. Mithilfe eines direkten Paradigmas (einzelne Fingerbewegungen gegen Ruhe) fanden sie weit überlappende Aktivierungen. Das indirekte Paradigma (Fingerbewegung eines Fingers gegen die eines anderen Fingers) resultierte dagegen in räumlich klar getrennten Aktivierungen für Einzelpersonen (vgl. Dechent & Frahm, 2003).

Ziel dieses direkten Paradigmas (Daumen- bzw. Kleiner Fingerbewegungen gegen Ruhe) ist die Bestimmung der Lage von Daumen (D1) und Kleinem Finger (D5) an der Hand. Dazu werden die signifikanten Schwerpunkte der Repräsentationsareale beider Gliedmaßen der entsprechenden Hand bestimmt. Überlappende Aktivierungen zwischen den Repräsentationsarealen der anderen Finger bleiben in diesem Zusammenhang ohne Konsequenzen, da nur die Trennung von D1 und D5 entscheidend ist, um Aussagen über die Ausdehnungen der Handrepräsentationen machen zu können. Dadurch sollen Differenzen zwischen den Gruppen bezüglich Größe der Hand-Repräsentationsareale ermittelt werden.

16.1.4 Das geeignete Paradigma und die sinnvolle Weiterverarbeitung der Daten zur Darstellung der Hand

Zentrale Zielstellung der Untersuchung ist der Nachweis der Vergrößerung der Hand-Repräsentationsareale durch Mehrgebrauch bei Gehörlosen. Interessant ist also, in welchem Hirnrindengebiet sich die Aktivierungen der Handbewegungen darstellen und durch welches Paradigma ein sinnvolles Aktivierungsmuster gezeigt werden kann. Das primärmotorische Areal M1 (auch: Gyrus praecentralis oder Motokortex oder Areal 4 nach Brodmann) ist direkt an der Exekution von motorischen Abläufen beteiligt. Das Kleinhirn und die Basalganglien spielen bei der Programmierung von motorischen Abläufen ebenfalls eine Rolle. Obwohl auch andere Strukturen an der Steuerung und dem Erlernen von Bewegungen beteiligt sind, gilt M1 am Ende des Verarbeitungsweges von Bewegungsimpulsen als Ursprungsort der Willkürbewegungen und steht in der hier durchgeführten Untersuchung im Vordergrund (vgl. Trepel, 1999). Die Abbildung 16.2 zeigt die Lage des Gyrus praecentralis (primärmotorischer Kortex).

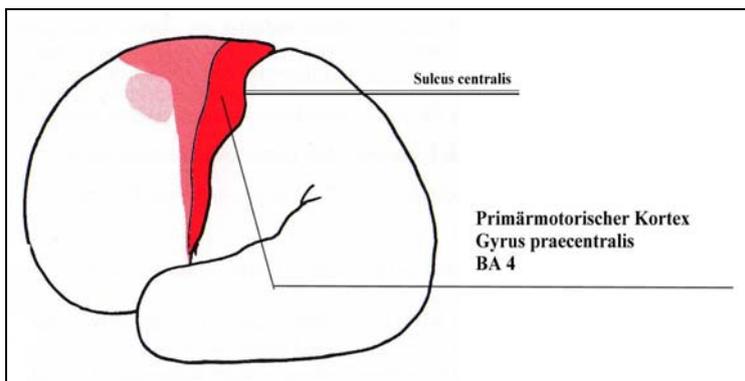


Abbildung 16.2: Sagittalschnitt: Gyrus praecentralis (primärmotorischer Kortex oder BA 4) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 196, 1999)

Zahlreiche Studien belegen, dass lineare Änderungen von Bewegungsparametern (hier: Handbewegungen) mit neuronalen Aktivitätsänderungen in M1, die z. B. mit der Positronen-Emissions-Tomografie (PET) messbar sind, einhergehen (vgl. Rao et al., 1996; Sadato, Campbell, Ibanez, Deiber & Hallett, 1996). Wichtig in diesem Zusammenhang ist eine weitere Studie von van der Kallen et al. (1996), die mithilfe von fMRT-Messungen eine signifikante Erhöhung der Aktivierungen im Gyrus praecentralis durch Ausführung von Fingerbewegungen nachwies (vgl. van der Kallen et al., 1996). Auch EEG-Messungen zeigten bei wiederholten Fingerflexionen Maxima, die im kontralateralen

Gyrus praecentralis lokalisiert waren (vgl. Boschert, Hink & Deecke 1983). Folglich scheint es sinnvoll, die zu untersuchenden Gruppen repetitive Fingerbewegungen ausführen zu lassen und mittels fMRT räumliche Aktivierungsunterschiede in M1 darzustellen. Zur Standardisierung der Bewegungen sollte der Rhythmus, in dem die Fingerbewegung ausgeführt werden soll, vorgegeben sein und somit auch die Geschwindigkeit (und die damit zusammenhängende Anstrengung) standardisiert werden. Wessel, Zeffiro, Toro & Hallett (1997) zeigten, dass eine auditive Geschwindigkeitsvorgabe der Fingerbewegungen durch ein Metronom zu der erwarteten Mehraktivierung im primärmotorischen Kortex führte (vgl. Wessel et al., 1997). Es wird daher erwartet, dass eine Geschwindigkeitsvorgabe durch visuelle Anweisungen per Bildschirm zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Zur Lokalisation der einzelnen Finger arbeiten die meisten Forschungsgruppen derzeit mit sogenannten *center-of-mass-Koordinaten* (= räumlicher Schwerpunkt) (z. B. vgl. Dechent & Frahm, 2003). Zur Bestimmung der Lage einzelner Finger wurden allerdings die *signifikanten Schwerpunkte* (= der Wert mit dem niedrigsten p-Niveau) des aktivierten Clusters bestimmt, um die Finger zur Berechnung des euklidischen Abstandes lokalisieren zu können. Diese Form der Datenerhebung ermöglicht nur Aussagen über die Lage des Körperteiles in M1, nicht über sein gesamtes Aktivierungsausmaß und zeigt keine überlappenden Aktivierungsmuster. Um Aussagen über die Größe des aktivierten Areals in M1 machen zu können, muss im Gegensatz dazu mit der Gesamtaktivierung auf einem vorher festgelegten Niveau gearbeitet werden. Mithilfe der Ermittlung der Voxelanzahl auf einem bestimmten Niveau kann so die Ausdehnung des Repräsentationsareals bestimmt werden. Die Repräsentationen der Finger sind dabei nach Angaben der Literatur in einer lateralen zu medialen (L-M), anterioren zu posterioren (A-P) und inferioren zu superioren (I-S) Beziehung organisiert (vgl. Maldjian, Gottschalk, Patel, Detre & Alsop, 1999; Gelnar, Krauss, Szevényi & Apkarian, 1998).

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist folglich der Vergleich der Repräsentationsareale beider Hände für die gebildeten Gruppenpaare mit einem geeigneten Paradigma. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob der Mehrgebrauch der Hände bei Gebärdensprachdolmetschern und Gehörlosen die neuronale Grundstruktur der Hand-Repräsentationsareale nachhaltig vergrößert.

17 Hypothesen des Motorik-Paradigmas

Eine Annahme, die in dieser Untersuchung bestätigt werden sollte war, dass Unterschiede in den Repräsentationsarealen für die Hände zwischen Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern gegenüber Hörenden, die nie Kontakt mit Gebärdensprache hatten, vorliegen. Ursächlich für diese Annahme ist die Mehrbenutzung der Arme, Hände und Finger bei Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern durch tägliches Ausüben von Gebärdensprache als Kommunikationsmittel. Bisherige Studien zu plastischen Veränderungen durch Mehrgebrauch konnten bereits eindeutig klären, dass die außerordentliche Mehrnutzung von Gliedmaßen zu einer Ausbreitung der Repräsentation dieses Körperteiles im motorischen und sensorischen Kortex führt (vgl. Pantev et al., 2001; vgl. Miltner & Weiss, 1999). Dieses Phänomen konnte, wie bereits erwähnt, bei Geigern, Pianisten und Braille-Lesern nachgewiesen werden (vgl. Elbert et al., 1995; vgl. Pantev et al. 2001; vgl. Sterr et al., 1998a). Allen drei Gruppen ist eine erhöhte somatosensorische bzw. motorische Inanspruchnahme der Hände gemein. Da Gebärdensprache vorrangig mit Händen und Armen ausgeführt wird, fällt die Gruppe der Gehörlosen mit in die Personengruppen, deren obere Extremitäten eine Zunahme der Nutzungshäufigkeit erfahren. Bisher liegen zu Repräsentationsarealen der Hände bei Gehörlosen keine Daten vor.

Im vorliegenden Teilparadigma der Studie soll untersucht werden, ob die durch fehlende Kommunikationsmöglichkeiten mittels auditiver Sprache erzwungene Mehrbenutzung beider Hände bei Gehörlosen einen Einfluss auf die Repräsentationsareale der Hände in M1 hat. Da Gebärdensprachdolmetscher durch Ausübung ihres Berufes ebenfalls eine verstärkte motorische Aktivität der oberen Extremitäten aufweisen, sollen diese Gruppe und die der Gehörlosen mit altersparallelisierten nicht-gebärdenden Hörenden verglichen werden.

17.1 Größe des Repräsentationsareals der Hände in M1

Zur Untersuchung, ob gebärdende Personen gegenüber nicht-gebärdenden ein vergrößertes Handareal aufweisen, wurde in der vorliegenden Studie eine Tappingaufgabe mit repetitiven Fingerbewegungen durchgeführt (vgl. Kapitel 18; Methodendarstellung). Im

Anschluss wurde die Anzahl der aktivierten Voxel zwischen den Gruppen verglichen. Folgende Hypothese wird gerichtet formuliert, da in der Literatur eine Vergrößerung des Handareals durch Mehrnutzung und eine damit einhergehende erhöhte Anzahl von aktivierten Voxeln postuliert wird:

Hypothese 11: Die Gruppen der Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher weisen eine höhere Anzahl aktivierter Voxel in M1 für die Hand, den Kleinen Finger und den Daumen auf, als ihre alters- und geschlechtsparallelisierten Kontrollgruppen (=Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2).

17.2 Ausdehnung der Handrepräsentation

Eine erhöhte Anzahl von aktiven Voxeln resultiert in einer stärkeren Ausdehnung des Handareals und somit in einer Vergrößerung des euklidischen Abstandes (vgl. Kapitel 18) zwischen Daumen (D1) und Kleinem Finger (D5). Um zu untersuchen, ob es Unterschiede zwischen der Ausdehnung der Hände von Gebärdensprachnutzern gegenüber nicht-gebärdenden Personen gibt, wurde der euklidische Abstand der jeweils rechten und linken Hand zwischen den signifikanten Schwerpunkten von D1 und D5 ermittelt. Aufgrund der Vorannahme, dass die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher ihre Arme und Hände durch den Gebrauch der Gebärdensprache deutlich häufiger benutzen und ein Mehrgebrauch zu einer Vergrößerung der Repräsentationsareale der Hände führt (vgl. Miltner & Weiss, 1999), wird folgende Hypothese gerichtet aufgestellt:

Hypothese 12: Der euklidische Abstand zwischen D1 und D5 ist bei Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern größer als bei Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2. Diese Hypothese gilt sowohl für den euklidischen Abstand der rechten Hand als auch den der linken Hand.

17.3 Quotientenbildung

Für die Gruppe der Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher wird eine bimanuale Ausführung der Gebärdensprache angenommen, da zur Ausführung von Gebärden in der Regel eine Begleit- und eine Führungshand benötigt wird (vgl. Boyes Bream, 1995). Bei gesunden Kontrollgruppen (Rechtshänder) ohne außergewöhnliche Mehrbenutzung der Hände konnte in der Literatur dagegen eine leichte „Überlegenheit“ der rechten Hand belegt werden, also eine leicht vergrößerte Handrepräsentation der rechten Hand (vgl. Elbert et al., 1995; Braun, Schweizer, Elbert, Birbaumer & Taub, 2000). Es wurde der Quotient zwischen dem euklidischen Abstand der linken Hand und dem der rechten Hand gebildet. Dieser veranschaulicht die Beziehung der Distanz von Daumen und Kleinem Finger zwischen rechter und linker Hand. Aufgrund der Vorannahmen wurde folgende gerichtete Hypothese formuliert:

Hypothese 13: Der euklidische Abstand der linken Hand ist bei Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern aufgrund der bimanualen Ausführung von Gebärdensprache gleich groß oder größer als der der rechten Hand. Folglich ist der Quotient von linker/rechter Hand ≥ 1 . Bei den Kontrollgruppen ergibt die Quotientenbildung des euklidischen Abstandes von linker/rechter Hand dagegen einen Wert < 1 .

18 Methode des Motorik-Paradigmas

18.1 Probanden

Die Untersuchung wurde ausschließlich mit Rechtshändern durchgeführt. Die erste Versuchsgruppe bestand aus elf Gehörlosen (GL). In der entsprechenden alters- und geschlechtsparallelisierten Kontrollgruppe befanden sich elf Hörende (K1). Die Daten von zwei Probanden der K1 mussten im Nachhinein aufgrund technischer Probleme ausgeschlossen werden. Die zweite Versuchsgruppe bildeten acht Gebärdensprachdolmetscher (D). Deren ebenfalls altersparallelisierte Kontrollgruppe bestand aus zehn Hörenden (K2). Detaillierte Angaben zu soziodemografischen Daten können dem Abschnitt 5.2 entnommen werden.

18.2 Aufgabe

Da ausschließlich Aktivierungen im primärmotorischen Kortex (M1) untersucht werden sollten, und das Ziel die Untersuchung der Repräsentationen der Hand bzw. der Finger in M1 war, wurde auf eine sequenzielle Fingerbewegung verzichtet, da eine komplexe Sequenztestaufgabe ständige Reprogrammierung aufgrund der sich stetig veränderten Möglichkeiten nach jeder Bewegung erfordert (siehe Abbildung 18.1). Zur Darstellung der Repräsentation der Hand in M1 schien die Durchführung einfacher, repetitiver Fingerbewegungen geeigneter.

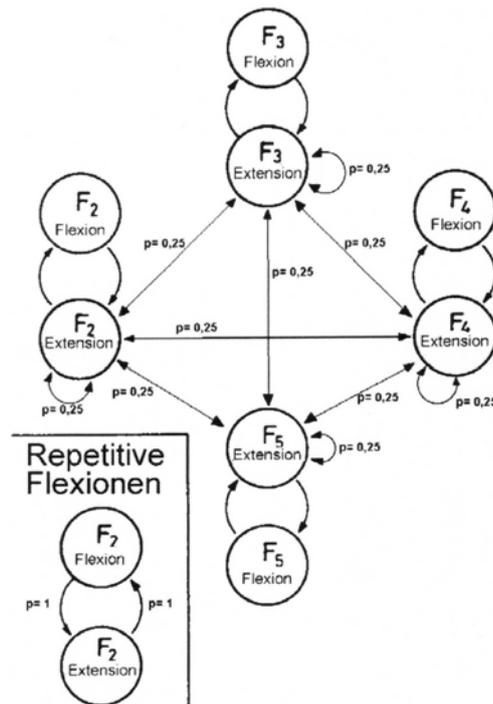


Abbildung 18.1: Schema zur Programmierung motorischer Sequenzen bei einer komplexen, sequenziellen Fingerbewegung gegenüber einer von den Probanden dieser Untersuchung ausgeführten einfachen, repetitiven Fingerbewegung. F₂=Zeigefinger, F₃=Mittelfinger, F₄=Ringfinger, F₅=Kleiner Finger (Quelle: Forster, S. 8, 2002)

Zur Erzeugung eines Anstieges der hämodynamischen Antwort in M1 wurde während der fMRT-Untersuchung eine repetitive Fingertapping-Aufgabe durchgeführt. Die Tapping-Bewegung wurde mit Daumen (D1), Kleinem Finger (D5) oder der ganzen Hand ausgeführt. Die durchzuführende Bewegungsaufgabe ist in Abbildung 18.2 mit dem Ausgangszustand und der jeweiligen Endposition zu sehen. Aufgabe war es, den geforderten Finger (bzw. die gesamte Hand) gestreckt mit einem Winkel von ungefähr 45° nach dorsal zu flektieren. Dabei wurde der entsprechende Finger bzw. die Hand ca. einmal pro Sekunde bewegt. Ausgangsstellung war die flach ausgestreckte Hand auf dem Oberschenkel der liegenden Testperson (siehe Abbildung 18.2). Der Rhythmus des Tappings erfolgte in Antwort auf visuelle Stimuli. Die Performance wurde vor der fMRT-Untersuchung geübt und sollte ohne maximale Anstrengung im Scanner reproduziert werden. Zeigefinger (D2), Mittelfinger (D3) und Ringfinger (D4) wurden zur Erleichterung des Fingertappings von D1 und D5 mit Klebeband fixiert. Außerdem sollten so Mitbewegungen unerwünschter Finger minimiert werden. Das Tapping von D1, D5 oder der gesamten Hand wurde mit der linken und rechten Hand ausgeführt. Die

beginnende Hand im Test wurde über alle Versuchspersonen randomisiert, um Reihenfolgeeffekte auszuschließen. Die genauen Angaben zur Abfolge des motorischen Paradigmas und der entsprechenden Anzahl der Scans sind in Abschnitt 5.4 bis 5.6 nachzulesen.



Abbildung 18.2: Performance des Finger- und Handtapping; v.l.n.r.: Ausgangsstellung, Endposition vom Tapping des Daumens, des Kleinen Fingers, der Hand (eigene Darstellung)

18.3 Hypothesengeleitete Verarbeitung der Daten

Number-of-Voxels

Zentrales Anliegen war die Bestimmung der Größe des aktivierten Areals durch die Bewegung der Hand bzw. des Kleinen Fingers und des Daumens in M1 für alle Versuchsgruppen. Um Unterschiede zwischen den Gruppen zu erkennen, wurden mittels Brain Voyager® die positiv-aktivierten Voxel in der vorab definierten ROI (*Region of interest*) Gyrus praecentralis (BA 4) sowohl für die kontralaterale als auch für die ipsilaterale Hirnhemisphäre zur jeweils bewegten Seite erhoben. Die Datenerhebung erfolgte für die drei Prädiktoren 'Hand', 'Kleiner Finger' und 'Daumen' separat. Das p-Niveau für alle Berechnungen im Motorik-Paradigma betrug 0,001. Das p-Niveau ist die festgelegte Signifikanzgrenze, an der gemessen alle aktivierten Voxel in Berechnungen aufgenommen wurden, die diese Grenze nicht überschritten. Dieses etwas konservativere Niveau soll starke Überlappung durch zu hohe Aktivierungen vermeiden. Als Voxelgröße wurde $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ festgelegt; als untere Grenze (*cut off*) drei zusammenhängende Voxel. Das bedeutet, dass alle Aktivierungen von den Berechnungen ausgeschlossen wurden, die \leq drei Voxel der Größe $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ waren. Somit sollten falsch-positive Resultate (zufällig aktivierte Voxel) vermieden werden. Die Number-of-Voxels-Berechnung gab den Aktivierungsumfang der Hand (bzw. Kleiner Finger, Daumen) im Verhältnis zur gesamten Voxelanzahl des Gyrus praecentralis an. Bei einer Number-of-Voxels-Berechnung wird die Anzahl der aktiven, zusammenhängenden Voxel bestimmt, die eine geringere

Irrtumswahrscheinlichkeit für die Aktivierung aufweisen, als das vorgegebene Niveau festlegt (hier: $p < 0,001$). In die sich anschließenden Berechnungen werden alle Voxel aufgenommen, die eine vorher festgelegte Grenze zur Anzahl der aktivierten Voxel überschreiten (hier: drei zusammenhängende Voxel). Zur Darstellung von Gruppenunterschieden wurde eine ANOVA (= Analysis of variance) mit Messwiederholung mittels SPSS[®] Version 12.0 durchgeführt.

Euklidischer Abstand (= EA)

Um detaillierte Informationen zur Ausdehnung der Repräsentationsareale der Hände von Gehörlosen, Gebärdensprachdolmetschern und Hörenden zu erhalten, wurde der euklidische Abstand berechnet. Der euklidische Abstand ist die Berechnung der Distanz zwischen zwei Punkten im euklidischen Raum. Ein euklidischer Raum lässt sich in den interessanten drei Dimensionen beschreiben und wird durch Rechenvorgänge mit Skalaren zu einem reellen Vektorraum. Das Skalarprodukt von zwei Punkten im Vektorraum ermöglicht die algebraische Definition von Abständen zwischen diesen Punkten. In der Abbildung 18.3 ist die Berechnung für den Abstand zweier Punkte im dreidimensionalen Raum durch die euklidische Metrik verdeutlicht. Die Berechnung erfolgte zwischen dem signifikanten Schwerpunkt der Aktivierung für den Daumen (D1) und dem für den Kleinen Finger (D5), da diese beiden Finger die Ausdehnung der gesamten Hand umspannen. Da die Daten in Brain Voyager[®] im dreidimensionalen Raum dargestellt werden, besteht jeder signifikante Schwerpunkt aus je drei Koordinatenwerten. Dabei erhält der Schwerpunkt x im euklidischen Raum die Koordinaten x_1, x_2, x_3 . Der zweite Schwerpunkt y wird durch die Ausprägungen y_1, y_2, y_3 beschrieben. Die statistische Weiterverarbeitung der Daten erfolgte mittels einer ANOVA mit Messwiederholung zur Darstellung von Gruppenunterschieden bezüglich der euklidischen Abstände, sowie Unterschieden zwischen linker und rechter Hand innerhalb einer Gruppe. Der euklidische Abstand für die linke Hand wurde bei allen Gruppen mit dem der rechten Hand verglichen. Außerdem wurde nach Unterschieden bzw. Gemeinsamkeiten im Abstand von D1 und D5 der Hände beim Vergleich innerhalb eines Gruppenpaares gesucht (*GL versus K1* und *D versus K2*).

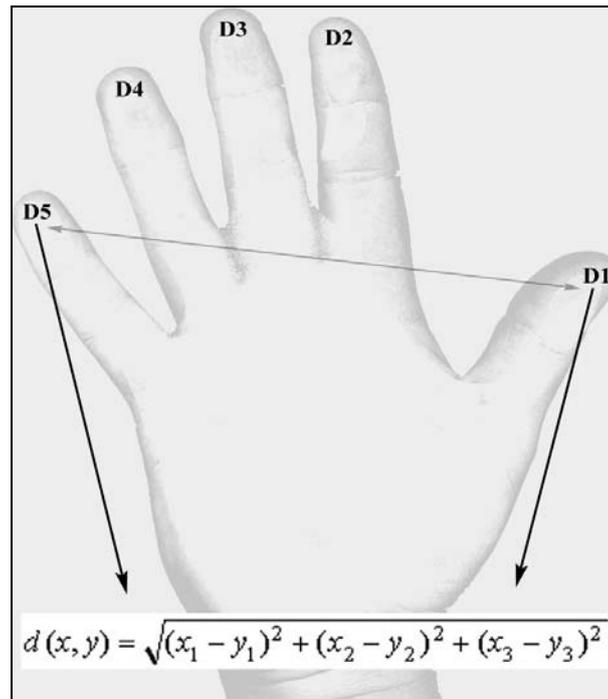


Abbildung 18.3: Die Nomenklatur der Finger und Formel zur Berechnung des euklidischen Abstandes zwischen zwei Punkten im dreidimensionalen Raum. Der Abstand d zwischen den zwei Punkten x mit den Koordinaten x_1, x_2, x_3 und y mit den Koordinaten y_1, y_2, y_3 . (eigene Darstellung)

Quotientenberechnung

Für die errechneten euklidischen Abstände wurde der Quotient der euklidischen Abstände zwischen D1 und D5 zwischen der rechten und linken bzw. linken und rechten Hand errechnet. Die Formel zeigt beispielhaft die Quotientenbildung zwischen dem euklidischen Abstand zwischen D1 und D5 der linken Hand und dem euklidischen Abstand von D1 und D5 der rechten Hand durch Division:

$$Q_{EAli/re} = \frac{\sqrt{(x_{1li} - y_{1li})^2 + (x_{2li} - y_{2li})^2 + (x_{3li} - y_{3li})^2}}{\sqrt{(x_{1re} - y_{1re})^2 + (x_{2re} - y_{2re})^2 + (x_{3re} - y_{3re})^2}}$$

Formel 18.1 Formel zur Berechnung des euklidischen Abstandes zwischen zwei Punkten

Zeichenerklärung: EA = euklidischer Abstand ; li = links; re = rechts
 x = Punkt x mit den Koordinaten x_1, x_2, x_3
 y = Punkt y mit den Koordinaten y_1, y_2, y_3

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Motorik-Paradigmas dargestellt.

19 Ergebnisse des Motorik-Paradigmas

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse des Tapping-Paradigmas dargestellt. Diese sind nach *Lagebestimmung* der Repräsentationsareale von Daumen und Zeigefinger (Lokalisationskoordinaten der aktivierten Kortextareale bei Bewegung der Finger bzw. der ganzen Hand), der *Anzahl der aktivierten Voxel* (Number-of-Voxels), dem *euklidischen Abstand* zwischen dem Repräsentationsareal des Daumens (D1) und dem des Kleinen Fingers (D5), sowie dem gebildeten *Quotienten* zwischen dem Abstand des Repräsentationsareals der linken und dem der rechten Hand gegliedert (vgl. Abschnitt 18.3). In den meisten Fällen werden die Ergebnisse bezüglich der gebildeten Gruppenpaare dargestellt, also für das Paar *Gehörlose* und *Kontrollgruppe 1* (GL – K1) sowie für das Paar *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2* (D – K2). Zur Klärung von Unterschieden hinsichtlich der aktiven Voxel auf der kontralateralen und ipsilateralen Hemisphäre (Lateralitätsfragen) wurde *innerhalb* der jeweils untersuchten Bedingung geprüft.

19.1 Lokalisation der Finger- und Handrepräsentationen

Als Vorbereitung für das Errechnen der euklidischen Abstände zwischen dem Repräsentationsareal von D1 und dem von D5 mussten zunächst deren Repräsentationsareale auf dem Gyrus praecentralis lokalisiert werden. Eine leichtere Identifikation des Handareals ist inzwischen aufgrund anatomischer Charakteristika möglich. Das markante Handareal als sogenannte „Handbeule“ stellt sich in 90% der untersuchten Fälle als ein umgedrehtes Omega (Ω) und in 10% der Fälle als ein horizontal ausgerichtetes Epsilon (ϵ) im mittleren Teil des M1 dar (vgl. Yousry et al., 1997). Zunächst wurde immer separat ein Prädiktor (= zur Vorhersage eines Merkmals herangezogene Variable; hier: Bewegung von Daumen, Kleiner Finger, Hand) aktiviert und das Signifikanzniveau soweit verändert, bis nur noch wenige, aktive Voxel in der Handregion sichtbar waren. Die Einstellung wurde so gewählt, dass nur positive Voxel angezeigt wurden. Eine detaillierte Erklärung dieser Herangehensweise ist in Abschnitt 5.7.4 zu finden. Nach Beratung mit einem Experten wurde im Anschluss aus den verbliebenen Aktivierungen die genaue Lage der Repräsentationsareale von Daumen bzw. Kleinem

Finger lokalisiert. Diese Vorgehensweise wurde nur gewählt, wenn mehrere Cluster zur Auswahl standen. Dann wurde die Lokalisation der Repräsentationsareale von Daumen und kleinem Finger von zwei Personen unabhängig bewertet. Wenn die Angaben übereinstimmten, wurden die Werte übernommen; bei divergenten Ergebnissen wurden neue Überlegungen angestellt. Im Anschluss an diese Herangehensweise wurden die Koordinaten der signifikanten Schwerpunkte (der Wert mit dem kleinsten p-Wert) gespeichert.

Tabelle 19.1 zeigt eine Übersicht der für jede Gruppe gemittelten, signifikanten Schwerpunkte der Finger- und Handrepräsentationen sowie die Anzahl der aktiven Voxel auf der kontra- und ipsilateralen Hemisphäre beim Tapping mit der *rechten* Hand. Analog dazu zeigt die Tabelle 19.2 die Werte für das Tapping mit der *linken* Hand. Die Individualdaten für die Koordinaten der signifikanten Aktivierungsschwerpunkte sowie für die Anzahl der aktivierten Voxel sind in Anhang O auf der beigefügten CD aufgelistet. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Koordinaten der lokalisierten Aktivierungsschwerpunkte immer auf die zur bewegten Hand kontralaterale Hirnhemisphäre beziehen, da Bewegungen von dieser Hemisphäre gesteuert und verarbeitet werden (vgl. Trepel, 1999).

Tabelle 19.1: Lokalisation und Größe der individuellen Finger- bzw. Handrepräsentationen in M1 beim Tapping mit der rechten Hand, gemittelt über alle Individuen der Gruppe

Gruppe	Finger/ Hand	räumliche Koordinaten / mm *			Anzahl der Voxel ** kontralateral / ipsilateral	
		M - L	P - A	I - S		
Gehörlose ^a	D1	-40.27 ± 3.58	-24.64 ± 6.07	58.00 ± 5.04	40.18 ± 29.94	11.36 ± 15.94
	D5	-38.64 ± 3.91	-25.82 ± 4.35	54.91 ± 6.47	43.36 ± 24.00	13.36 ± 21.65
	Hand ^e				48.36 ± 28.70	13.09 ± 21.80
Kontrollgruppe 1 ^b	D1	-37.33 ± 6.80	-21.44 ± 5.73	58.78 ± 4.60	49.27 ± 23.73	11.18 ± 11.78
	D5	-34.67 ± 5.70	-26.11 ± 4.59	60.33 ± 6.63	46.27 ± 22.52	11.82 ± 12.06
	Hand ^e				57.73 ± 28.92	12.55 ± 13.04
Dolmetscher ^c	D1	-36.63 ± 5.37	-24.88 ± 7.47	52.00 ± 4.90	38.50 ± 17.57	5.25 ± 5.73
	D5	-33.38 ± 3.38	-29.25 ± 7.05	53.75 ± 5.04	44.25 ± 21.00	7.75 ± 10.46
	Hand ^e				47.25 ± 18.93	7.25 ± 9.39
Kontrollgruppe 2 ^d	D1	-41.90 ± 3.75	-24.00 ± 7.48	51.80 ± 3.79	44.20 ± 20.52	5.80 ± 8.52
	D5	-37.10 ± 5.30	-29.70 ± 6.85	59.00 ± 4.00	36.80 ± 21.50	4.10 ± 7.72
	Hand ^e				48.70 ± 25.12	4.70 ± 8.67

*Koordinaten der signifikanten Schwerpunkte der Aktivierungen auf der linken Hirnhemisphäre (Durchschnitt ± SD)

**Anzahl der positiv-aktiven Voxel auf der kontra- bzw. ipsilateralen Hirnhemisphäre; p<0,001; Voxelgröße: 3x3x3mm³; cut off: 3 Voxel

^a n = 11; ^b n = 9; ^c n = 8; ^d n = 10

^e Koordinaten für die Repräsentationsareale der Hände wurden nicht erhoben, da sie für den euklidischen Abstand zwischen D1 und D5 nicht von Interesse waren

D1 = Daumen; D5 = Kleiner Finger; M-L = medial-lateral; P-A = posterior-anterior; I-S = inferior-superior

Tabelle 19.2: Lokalisation und Größe der individuellen Finger- bzw. Handrepräsentationen in M1 beim Tapping mit der linken Hand, gemittelt über alle Individuen der Gruppe

Gruppe	Finger/ Hand	räumliche Koordinaten / mm *			Anzahl der Voxel ** kontralateral / ipsilateral	
		M - L	P - A	I - S		
Gehörlose ^a	D1	36.73 ± 3.90	-20.27 ± 2.65	54.09 ± 6.61	46.55 ± 27.43	12.27 ± 11.65
	D5	32.82 ± 5.12	-25.91 ± 5.74	53.55 ± 7.45	45.73 ± 27.12	11.00 ± 13.26
	Hand ^e				51.55 ± 30.97	13.91 ± 18.77
Kontrollgruppe 1 ^b	D1	36.00 ± 4.03	-20.00 ± 3.39	50.22 ± 5.56	55.90 ± 19.31	16.10 ± 16.94
	D5	32.00 ± 4.24	-26.44 ± 4.25	54.33 ± 5.66	52.40 ± 21.43	17.50 ± 15.65
	Hand ^e				61.50 ± 23.67	18.20 ± 16.81
Dolmetscher ^c	D1	34.38 ± 5.93	-25.25 ± 7.07	50.88 ± 3.31	44.88 ± 24.85	11.13 ± 6.83
	D5	29.75 ± 4.43	-28.00 ± 5.18	51.75 ± 4.92	38.88 ± 19.85	12.63 ± 7.41
	Hand ^e				56.25 ± 27.16	20.13 ± 11.03
Kontrollgruppe 2 ^d	D1	37.60 ± 3.41	-24.70 ± 6.34	54.50 ± 3.81	51.30 ± 28.67	13.00 ± 20.46
	D5	34.00 ± 2.00	-31.20 ± 3.52	56.70 ± 5.25	45.80 ± 26.19	17.80 ± 24.02
	Hand ^e				56.70 ± 36.11	21.60 ± 31.27

*Koordinaten der signifikanten Schwerpunkte der Aktivierungen auf der rechten Hirnhemisphäre (Durchschnitt ± SD)

**Anzahl der positiv-aktiven Voxel auf der kontra- bzw. ipsilateralen Hirnhemisphäre; p<0,001; Voxelgröße: 3x3x3mm³; cut off: 3 Voxel

^a n = 11; ^b n = 9; ^c n = 8; ^d n = 10

^e Koordinaten für die Repräsentationsareale der Hände wurden nicht erhoben, da sie für den euklidischen Abstand zwischen D1 und D5 nicht von Interesse waren

D1 = Daumen; D5 = Kleiner Finger; M-L = medial-lateral; P-A = posterior-anterior; I-S = inferior-superior

19.2 Prüfung der Hypothese 11

Um das Ausmaß der Aktivierungen beim Tapping zwischen den Gruppen vergleichen zu können, wurde die Anzahl der aktivierten Voxel berechnet. Die Number-of-Voxels-Berechnung erfolgte auf einem Signifikanzniveau von $p < 0.001$. Das Volumen eines Voxels betrug $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$. Alle Aktivierungen ≤ 3 zusammenhängender Voxel wurden von den Berechnungen ausgeschlossen. Mittels *fixed effect* (vgl. Abschnitt 5.7.4.2) wurde von jeder Versuchsperson getrennt die Anzahl der aktiven Voxel bei der Bewegung der Hand, des Daumens und des Kleinen Fingers eruiert. Die aufgestellte Hypothese beinhaltete, dass die Gruppen *Gehörlose* und *Gebärdensprachdolmetscher* signifikant höhere Aktivierungen durch die Tapping-Aufgabe in M1 aufweisen als ihre jeweilige Kontrollgruppe (vgl. Abschnitt 17.1). In der Abbildung 19.1 sind die Aktivierungsumfänge auf der kontralateralen Hemisphäre für die Gruppen *Gehörlose* und *Kontrollgruppe 1* beim Tapping von D1 (= D = Daumen), D5 (= KF = Kleiner Finger) und H (= Hand) zu sehen, Abbildung 19.2 zeigt dies für den Vergleich zwischen den Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Kontrollgruppe 2*. Detaillierte Angaben zu den Ergebnissen befinden sich in Anhang P auf der beigegeführten CD.

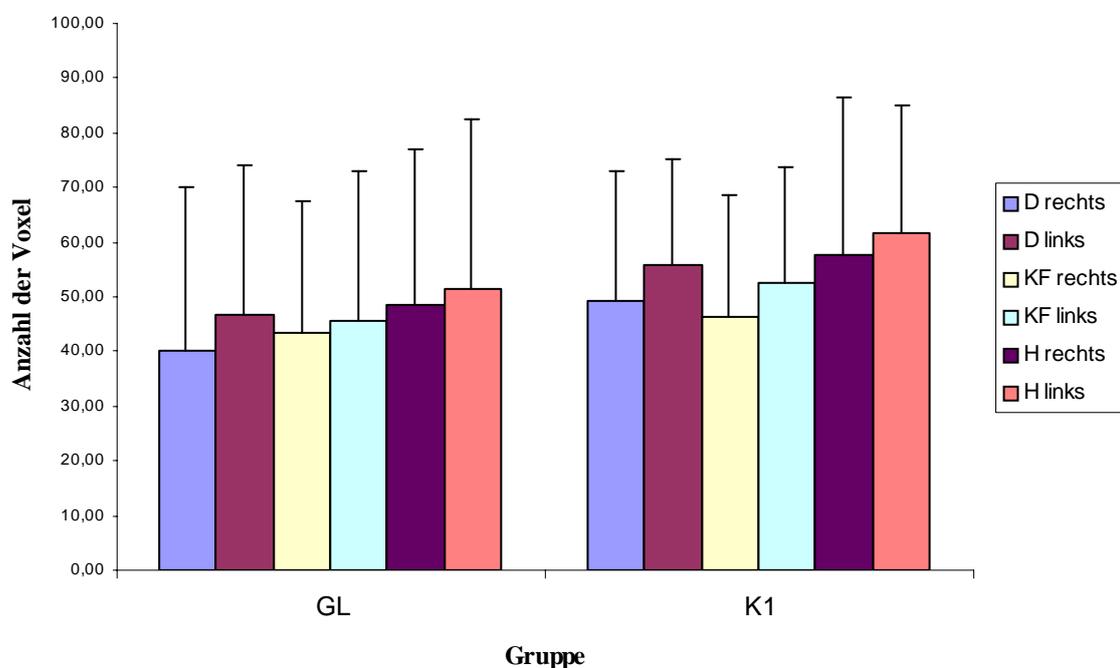


Abbildung 19.1:

Anzahl der aktiven Voxel auf der kontralateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen *Gehörlose* (=GL) und *Kontrollgruppe 1* (=K1). Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)

Um eventuell auftretende Unterschiede in den ipsilateralen Aktivierungsmustern zu sehen, sind in den Abbildungen 19.3 und 19.4 die Aktivierungsumfänge für die Bewegungen von D1, D5 und Hand auf der ipsilateralen Hemisphäre dargestellt.

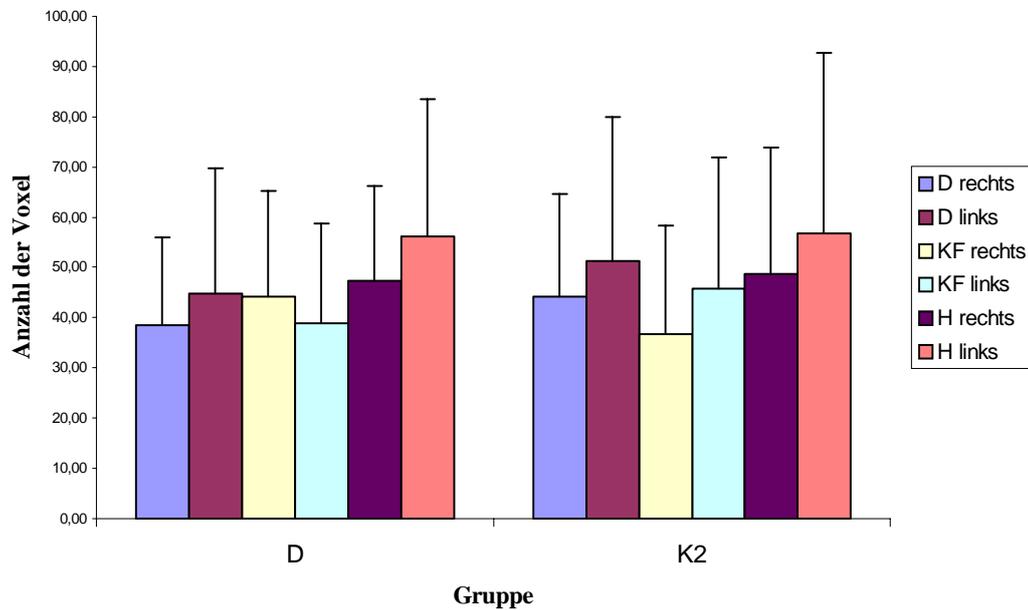


Abbildung 19.2:

Anzahl der aktiven Voxel auf der kontralateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher (=D)* und *Kontrollgruppe 2 (=K2)*. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)

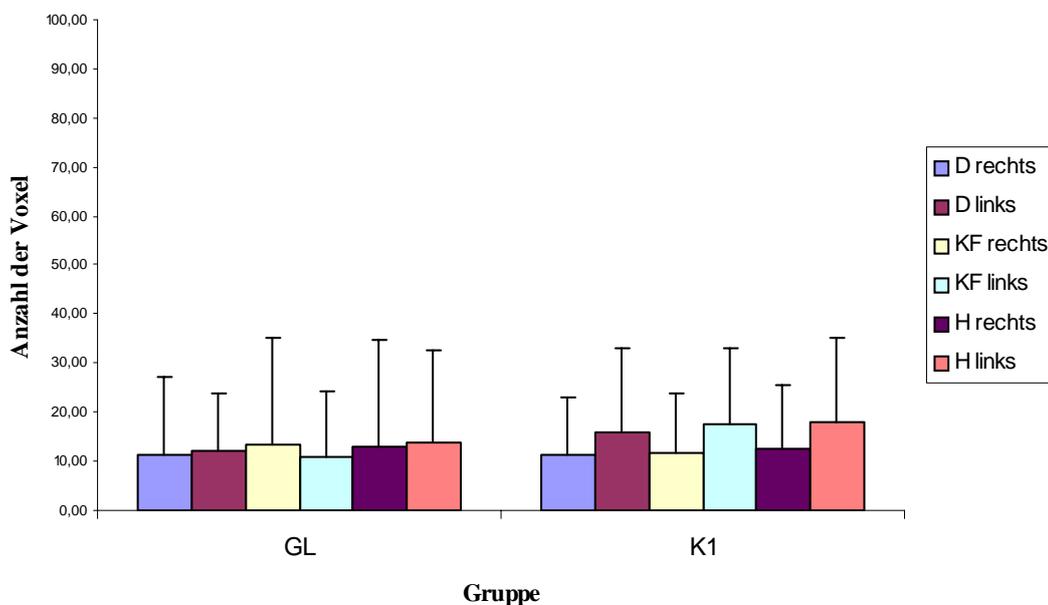


Abbildung 19.3:

Anzahl der aktiven Voxel auf der ipsilateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen *Gehörlose (=GL)* und *Kontrollgruppe 1 (=K1)*. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)

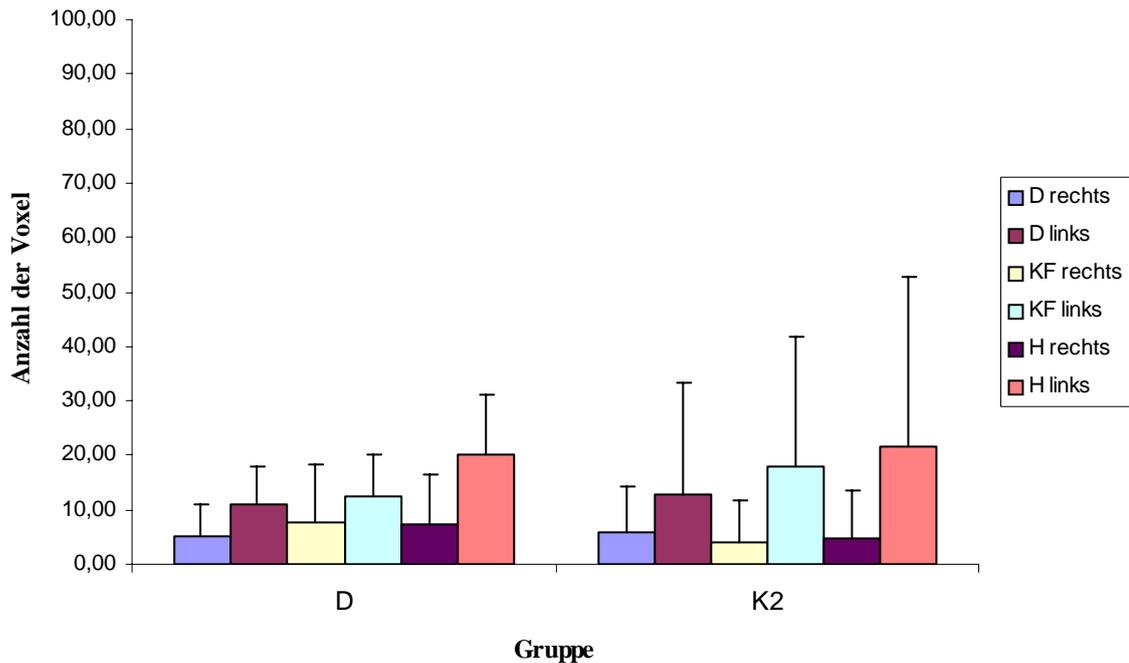


Abbildung 19.4: Anzahl der aktiven Voxel auf der ipsilateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher (=D)* und *Kontrollgruppe 2 (=K2)*. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)

19.2.1 Darstellung der Aktivierungsumfänge (Number-of-Voxel) für das Tapping mit der rechten Hand

Ziel des durchgeführten Tests war die Bestimmung von Unterschieden in der Anzahl der aktivierten Voxel zwischen den Gruppen, den Hemisphären und dem bewegten Gliedmaß für das Tapping mit der rechten Hand. Die statistische Auswertung erfolgte mittels einer dreifaktoriellen *ANOVA mit Messwiederholung*. Zum einen enthielt die ANOVA den vierfach gestuften Zwischensubjektfaktor „*Gruppe*“ mit den Ausprägungen Kontrollgruppe 1 (= K1), Kontrollgruppe 2 (= K2), Gehörlose (= GL) und Gebärdensprachdolmetscher (= D). Zum anderen wurde der zweifach gestufte Innersubjektfaktor „*Lateralität (= lat)*“ mit den Abstufungen kontralateral (= kl) und ipsilateral (= il) untersucht. Den letzten Faktor bildete der Innersubjektfaktor „*bewegter Finger (= bewfing)*“ mit den Abstufungen Daumen (= D), Kleiner Finger (= KF) und Hand (= H).

Detaillierte Angaben zu den statistischen Tests befinden sich in Anhang Q auf der beigefügten CD. Der Mauchly-Test auf Sphärizität war weder für den dreifach gestuften

Innersubjektfaktor „bewegter Finger“, noch für die Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“ signifikant. Deswegen werden im Folgenden die unkorrigierten Prüfgrößen, Freiheitsgrade (= df) und p-Werte beschrieben [*bewfing*: df (2), $p = .2$, $\varepsilon = .92$; *lat*bewfing*: df (2), $p = .16$, $\varepsilon = .91$].

Der *Haupteffekt* „Gruppe“ wurde nicht signifikant [$F(3,36) = 0.525$, $p = .67$]. Die Gruppen unterscheiden sich somit im Mittel nicht bezüglich der Anzahl der aktivierten Voxel. Die *Interaktionen* „Gruppe * Lateralität“ [$F(3,36) = 0.328$, $p = .81$] und „Gruppe * bewegter Finger“ [$F(6,72) = 0.535$, $p = .78$] wiesen ebenfalls keine statistisch bedeutsamen Ergebnisse auf. Die Voxelanzahl war also zwischen den Gruppen sowohl vom Innersubjektfaktor „Lateralität (= lat)“, als auch von dem Innersubjektfaktor „bewegter Finger (= bewfing)“ unabhängig.

Der *Haupteffekt für den Innersubjektfaktor* „Lateralität“ mit den Abstufungen kontralateral (= kl) und ipsilateral (= il) wurde statistisch bedeutsam [$F(1,36) = 125.86$, $p < .05$]. Beim Vergleich der Mittelwerte wird deutlich, dass die Anzahl der aktivierten Voxel auf der zur bewegten Hand kontralateralen Seite bei allen Gruppen signifikant größer sind als die der ipsilateralen Seite [kontralateral: $\bar{x} = 45.62$, $SE = 3.47$; ipsilateral: $\bar{x} = 9.29$, $SE = 1.87$; \bar{x} = Mittelwert; SE = Standardfehler]. Das Ergebnis bestätigt die Befunde zahlreicher Untersuchungen, in denen herausgefunden wurde, dass die Bewegungen eines Körperteiles mehr Aktivierungen in der kontralateralen Hemisphäre als in der ipsilateralen hervorrufen (vgl. Trepel, 1999). Dieses Phänomen resultiert aus den gekreuzten motorischen Bahnen, was zur Folge hat, dass Bewegungen der rechten Körperhälfte von der linken, also kontralateralen, Hemisphäre gesteuert werden. Da die Signifikanz dieses Haupteffektes nur bisherige Untersuchungsergebnisse bestätigt und die Richtigkeit der methodischen Durchführung der Versuche untermauert, wird darauf im Diskussionsteil nicht gesondert eingegangen. Die Abbildung 19.5 zeigt den Vergleich der gemittelten Voxelanzahl zwischen kontra- und ipsilateraler Seite separiert für den Daumen (a), den Kleinen Finger (b) und die Hand (c). Bei der statistischen Absicherung des Unterschiedes für den Innersubjektfaktor „Lateralität“ mithilfe von *T-Tests bei gepaarten Stichproben* wurden alle drei Tests signifikant [Daumen kl-il: $t(39) = 10.58$, $p < .016$; Kleiner Finger kl-il: $t(39) = 11.02$, $p < .016$; Hand kl-il: $t(39) = 11.17$, $p < .016$; *Bonferroni*]. Für die kontrastierten Paarvergleiche wurde der α -Fehler Bonferroni-korrigiert (hier: $p = 0.016$), um ein „familiäres“ Niveau zu gewährleisten.

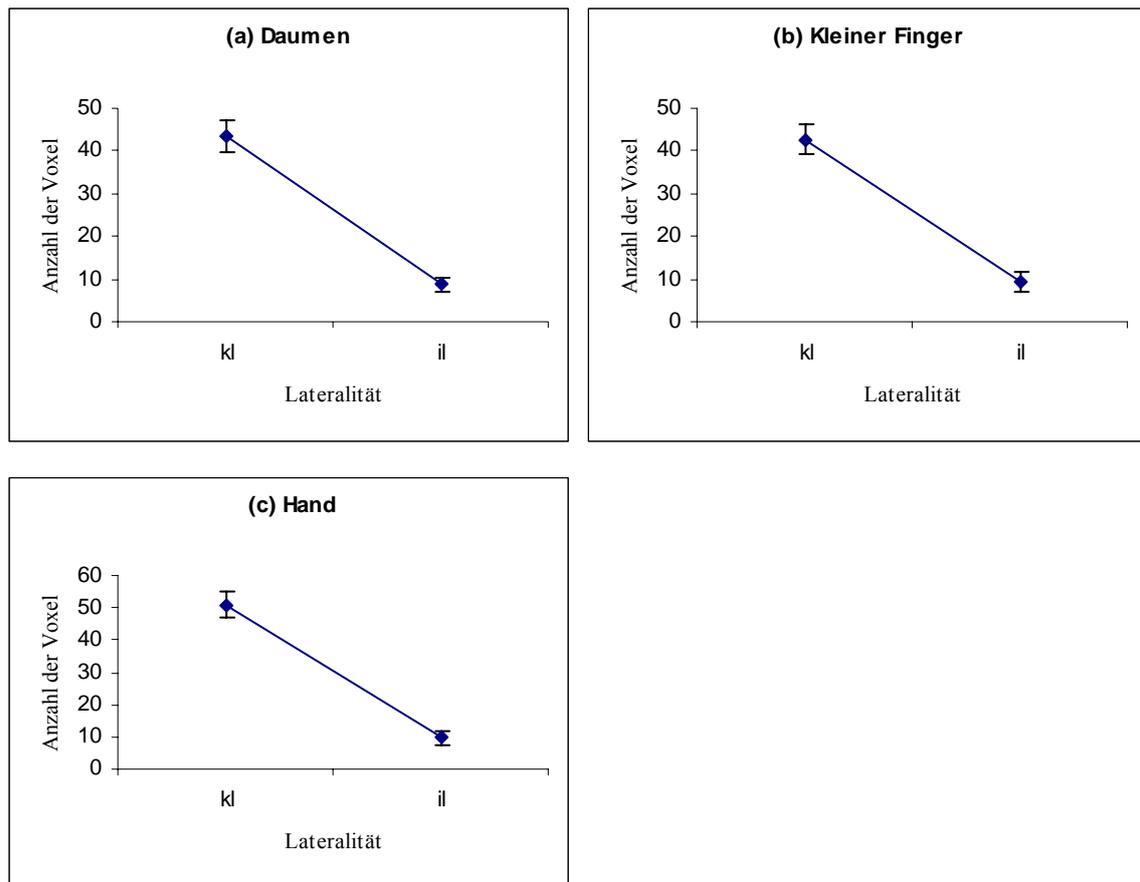


Abbildung 19.5: (a) bis (c) Darstellung der Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“. Gezeigt ist der jeweilige Haupteffekt „Lateralität“ für die Ausprägung des Faktors „bewegter Finger“. Vergleich der aktiven Voxel beim Tapping mit der rechten Hand zwischen der kontralateralen und ipsilateralen Seite gemittelt über alle Gruppen für die Ausprägungen Daumen (a) Kleiner Finger (b) und Hand (c). Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung)

Die Untersuchung des *Haupteffektes für den Innersubjektfaktor „bewegter Finger“* mit den Abstufungen Daumen (= D), Kleiner Finger (= KF) und Hand (= H) wurde statistisch nicht bedeutsam [$F(2,72) = 3.04, p = .54$]. Das bedeutet, dass es im Mittel über die Gruppen nicht relevant war, welches Gliedmaß bewegt wurde. Folglich war die Anzahl der aktivierten Voxel unabhängig vom bewegten Finger, wenn „Lateralität“ und „Gruppe“ dabei als konstante Terme definiert wurden.

Die *Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“* zeigte ein signifikantes Ergebnis [$F(2,72) = 8.35, p < .001$]. Anhand der Abbildung 19.6 wird ersichtlich, dass diese Interaktion darauf beruht, dass die Voxelanzahl zwischen KF und H sowie zwischen D und H für die kontralaterale Seite signifikant verschieden ist [Kleiner Finger – Hand_{kl}: $t(39) = -3.43, p < .001$; Daumen – Hand_{kl}: $t(39) = -2.94, p < .006$; *Bonferroni*]. Alle anderen *T-Tests bei gepaarten Stichproben* ergaben keine statistisch bedeutsamen Unterschiede [Kleiner Finger

- Daumen_{il}: $t(39) = .50$, $p = .62$; Kleiner Finger - Hand_{il}: $t(39) = -.09$, $p = .93$; Daumen - Hand_{il}: $t(39) = -.54$, $p = .60$; Kleiner Finger - Daumen_{kl}: $t(39) = -.28$, $p = .78$; *Bonferroni*; _{il} = ipsilateral, _{kl} = kontralateral]. Um ein „familiäres“ Niveau von $p = 0,05$ zu gewährleisten, wurde eine konservative Bonferroni-Korrektur des α -Fehlers durchgeführt, d. h. alle Prüfgrößen der kontrastierten Paarvergleiche wurden gegen ein korrigiertes α -Niveau von $p = 0,0083$ geprüft.

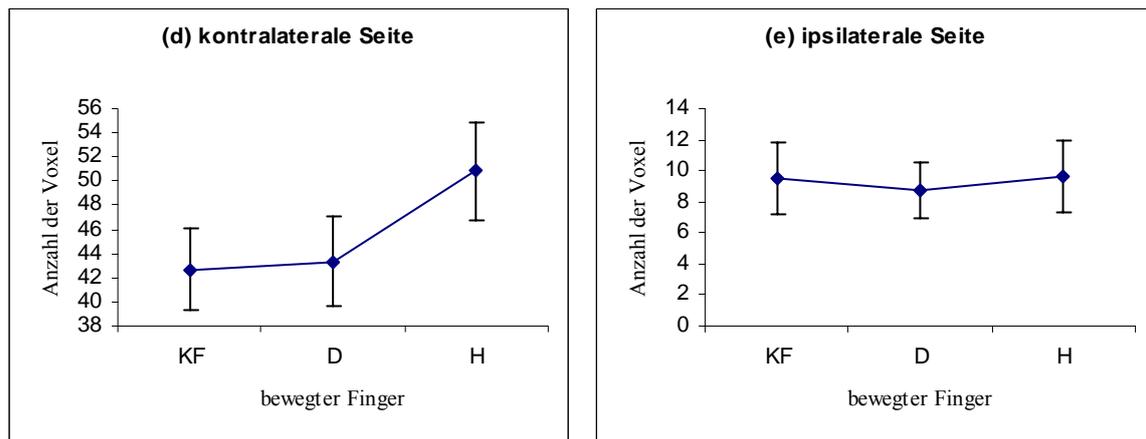


Abbildung 19.6: (d) bis (e) Darstellung der Interaktion „Lateralität*bewegter Finger“. Vergleich der aktivierten Voxelanzahl beim Tapping mit der rechten Hand von Kleinem Finger (KF), Daumen (D) und der Hand (H) für die kontralaterale Seite (d) und die ipsilateralen Seite (e) gemittelt über alle Gruppen. Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung)

19.2.2 Darstellung der Aktivierungsumfänge (Number-of-Voxel) für das Tapping mit der linken Hand

Analog zu den Untersuchungen der Anzahl der Voxel beim Tapping mit der rechten Hand werden im Folgenden die Ergebnisse für das Tapping mit der linken Hand vorgestellt. Es wurde ebenfalls eine dreifaktorielle *ANOVA mit Messwiederholung* durchgeführt. Die Zwischen- und Innersubjektfaktoren mit ihren jeweiligen Abstufungen entsprechen denen des Tests zum rechten Tapping. Detaillierte Angaben zu den statistischen Tests befinden sich in Anhang R auf der beigefügten CD.

Der zunächst erneut durchgeführte Mauchly-Test auf Sphärizität war weder für die Innersubjektfaktoren noch für die Interaktionen signifikant [*bewfing*: $df(2)$, $p = .94$, $\epsilon = .99$; *lat*bewfing*: $df(2)$, $p = .29$, $\epsilon = .93$] und erlaubt deshalb Berechnungen mit unkorrigierten Werten.

Für den *Haupteffekt* „Gruppe“ konnte kein statistisch bedeutsames Ergebnis nachgewiesen werden [$F(3,35) = 0.291, p = .83$]. Die *Interaktionen* „Gruppe * Lateralität“ [$F(3,35) = 0.196, p = .90$] und „Gruppe * bewegter Finger“ [$F(6,70) = 0.644, p = .70$] wiesen ebenfalls keine statistisch bedeutsamen Ergebnisse auf. Folglich gibt es auch hier, wie schon beim Tapping mit der rechten Hand nachgewiesen, keine Unterschiede zwischen den Gruppen bezüglich der Anzahl der aktivierten Voxel unabhängig von dem bewegten Gliedmaß und der Seite.

Der *Haupteffekt für den Innersubjektfaktor* „Lateralität“ (Abstufungen: *kl* und *il*) wurde signifikant [$F(1,35) = 103.34, p < .05$]. Wie schon beim Test für das Tapping mit der rechten Hand beschrieben, ist die Anzahl der aktivierten Voxel für die kontralaterale Seite signifikant größer als für die ipsilaterale Seite. Für die Bewegungssteuerung der linken Körperhälfte gilt der im Abschnitt 19.2.1 beschriebene Sachverhalt analog mit der rechten Hemisphäre. Das bedeutet, dass die Bewegungen mit der linken Hand von der rechten Hemisphäre gesteuert werden (vgl. Trepel, 1999). Folglich ruft die Bewegung signifikant mehr Aktivierungen in der rechten Hemisphäre hervor, als in der ipsilateralen linken Hemisphäre. Auch dieses Ergebnis wird aufgrund seines geringen Aussagewertes für vorliegende Fragestellungen nicht im Diskussionsteil aufgeführt.

Der Vergleich der Mittelwerte der aktivierten Voxel über alle Gruppen und die Abbildung 19.7 verdeutlichen den eben beschriebenen Sachverhalt [kontralateral: $\bar{x} = 50.75, SE = 2.41$; ipsilateral: $\bar{x} = 15.4, SE = 1.6$; \bar{x} = Mittelwert; SE = Standardfehler]. In den Abbildungen ist der Vergleich der Voxelanzahl zwischen kontra- und ipsilateraler Hemisphäre für den Daumen (a), den Kleinen Finger (b) und die Hand (c) getrennt zu sehen. Alle drei Vergleiche wurden mittels *T-Test bei gepaarten Stichproben* signifikant [Daumen kl-il: $t(38) = 11.21, p < .016$; Kleiner Finger kl-il: $t(38) = 9.53, p < .016$; Hand kl-il: $t(38) = 9.87, p < .016$; *Bonferroni*]. Für die multiplen Tests wurde der α -Fehler konservativ Bonferroni-korrigiert (hier: $p = 0.016$).

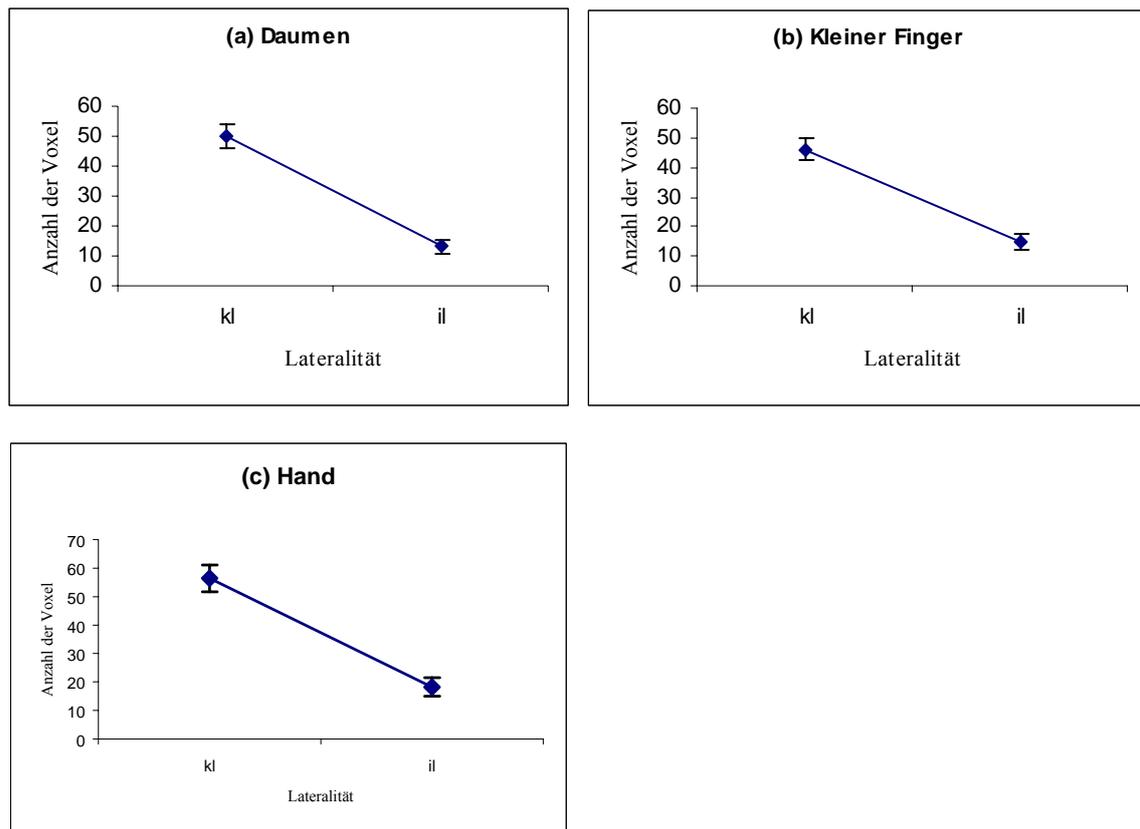


Abbildung 19.7: (a) bis (c) Darstellung der Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“. Gezeigt ist der jeweilige Haupteffekt „Lateralität“ für die Ausprägung des Faktors „bewegter Finger“. Vergleich der aktiven Voxel beim Tapping mit der linken Hand zwischen der kontralateralen und ipsilateralen Seite gemittelt über alle Gruppen für die Ausprägungen Daumen (a), Kleiner Finger (b) und Hand (c). Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung)

Ebenfalls statistisch bedeutsam wurde der *Haupteffekt* für den dreifach gestuften (*D*, *KF*, *H*) *Innersubjektfaktor* „bewegter Finger“ [$F(2,70) = 10.45, p < .05$]. Zur Verdeutlichung dieses Effektes wurde der Mittelwert aller aktiven Voxel der kontralateralen und ipsilateralen Hemisphäre über alle Gruppen für die Hand, den Kleinen Finger und den Daumen getrennt gebildet (vgl. Abbildung 19.8). Die anschließenden *T-Tests bei gepaarten Stichproben* zeigten, dass der Vergleich zwischen der Hand und dem Kleinen Finger sowie zwischen der Hand und dem Daumen signifikant wurde [$H-KF: t(77) = -4.93, p < .016$; $H-D: t(77) = -4.53, p < .016$; *Bonferroni*]. Der Vergleich der Anzahl aller aktiven Voxel zwischen dem Kleinen Finger und dem Daumen wurde dagegen statistisch nicht bedeutsam [$KF-D: t(77) = -0.80, p = .43$; *Bonferroni*]. Der α -Fehler wurde wegen der multiplen Tests konservativ Bonferroni-korrigiert (hier: $p = 0.016$).

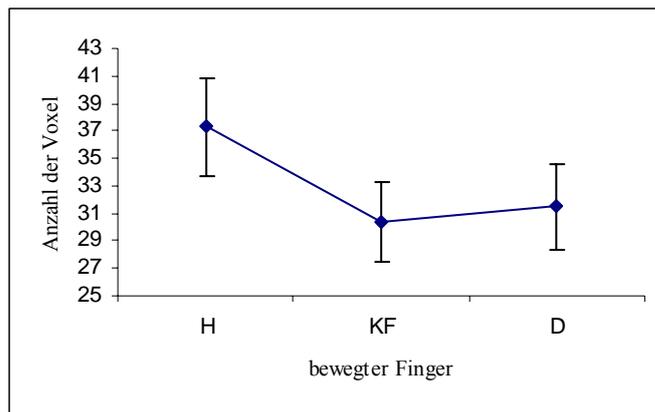


Abbildung 19.8: Darstellung des Haupteffektes „bewegter Finger“. Vergleich der Anzahl der Voxel für die kontra- und ipsilaterale Hemisphäre über alle Gruppen für die Ausprägungen Hand (H), Kleiner Finger (KF) und Daumen (D) (mit den entsprechenden SE als Fehlerindikator). (eigene Darstellung)

Der Vergleich der Mittelwerte der aktivierten Voxel über alle Gruppen und beide Hemisphären verdeutlicht das eben beschriebene Ergebnis [H: $\bar{x} = 37.32$, $SE = 3.57$; KF: $\bar{x} = 30.4$, $SE = 2.89$; D: $\bar{x} = 31.51$, $SE = 3.1$; \bar{x} = Mittelwert; SE = Standardfehler]. Die Daten belegen, dass das Tapping mit der ganzen Hand signifikant mehr Voxel aktiviert als Bewegungen mit dem Daumen oder Kleinen Finger. Aufgrund des geringen Aussagewertes wird dieses Ergebnis im Diskussionsteil nicht diskutiert.

Die Interaktion „*Lateralität * bewegter Finger*“ zeigte, wie schon beim Tapping mit der rechten Hand, auch für das Tapping mit der linken Hand ein signifikantes Ergebnis [$F(2,70) = 8.62$, $p < .05$]. Wie in den Abbildung 19.9 zu sehen ist, beruht dieses Ergebnis auf den statistisch bedeutsamen Unterschieden in der Voxelanzahl bei folgenden Paarvergleichen: [Daumen – Hand_{il}: $t(38) = -2.85$, $p < .007$; Kleiner Finger – Hand_{kl}: $t(38) = -4.53$, $p < .0083$; Daumen – Hand_{kl}: $t(38) = -3.51$, $p < .001$; *Bonferroni*]. Die drei anderen Paarvergleiche wurden dagegen nicht signifikant: [Kleiner Finger-Daumen_{il}: $t(38) = .96$, $p = .34$; Kleiner Finger – Hand_{il}: $t(38) = -2.37$, $p = .02$; Kleiner Finger-Daumen_{kl}: $t(38) = -1.70$, $p = .097$; *Bonferroni*].

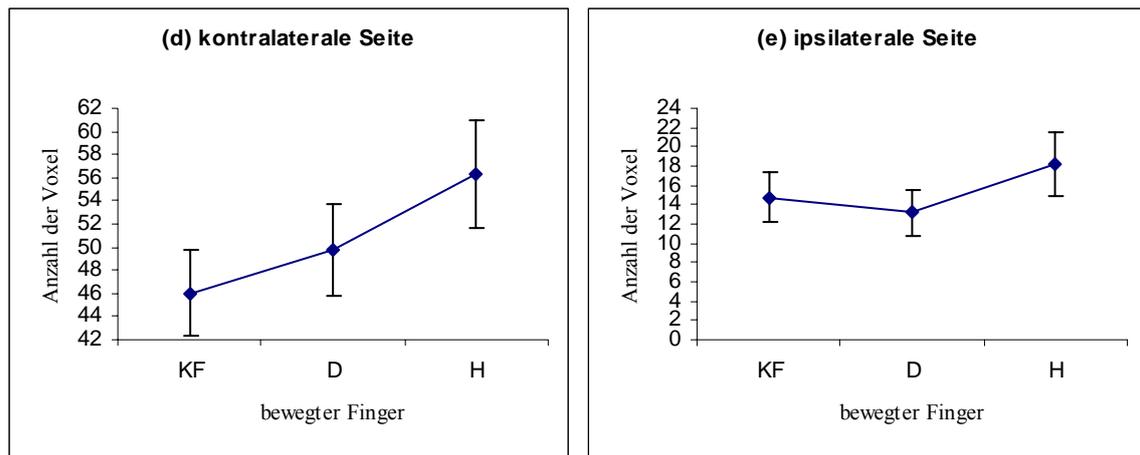


Abbildung 19.9: (d) bis (e): Darstellung der Interaktion „Lateralität*bewegter Finger“. Vergleich der aktivierten Voxelanzahl beim Tapping mit der linken Hand von Kleinem Finger (KF), Daumen (D) und der Hand (H) für die kontralaterale Seite (d) und die ipsilaterale Seite (e) gemittelt über alle Gruppen. Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung)

Um ein „familiäres“ Niveau von $p = 0,05$ zu gewährleisten, wurde eine konservative Bonferroni-Korrektur des α -Fehlers durchgeführt, d. h. alle Prüfgrößen der kontrastierten Paarvergleiche wurden gegen ein korrigiertes α -Niveau von $p=0,0083$ geprüft.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Vergleich der Anzahl aktivierter Voxel weder für das Tapping mit der linken Hand noch für das Tapping mit der rechten Hand signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen aufwies. Somit kann die Hypothese nicht bestätigt werden.

19.3 Prüfung der Hypothese 12

Der euklidische Abstand zwischen dem Repräsentationsareal von D1 und dem von D5 soll Auskunft über die Größe der Handrepräsentation in M1 geben. Nach der zuvor aufgestellten Hypothese sollten die Kontrollgruppen einen größeren, euklidischen Abstand für die rechte Hand verglichen mit der linken Hand aufweisen. Außerdem wird erwartet, dass der euklidische Abstand zwischen den Repräsentationsarealen von D1 und D5 sowohl für die linke als auch für die rechte Hand bei den gebärdenden Personen signifikant größer ist als bei den Personen, die keine Gebärdensprache ausüben. Tabelle 19.3 führt die euklidischen Abstände zwischen den Repräsentationsarealen von D1 und D5 in Millimeter für beide Hände aller Gruppen auf. Die grafische Darstellung der angeführten Vergleiche findet sich in Abbildung 19.10.

Tabelle 19.3: Abstände zwischen den individuellen Fingerrepräsentationen (D1 und D5) im primärmotorischen Kortex (in Millimetern)

	GL	K1	D	K2		GL	K1	D	K2
Probandennummer					Probandennummer				
EA für die RA der linken Hand					EA für die RA der rechten Hand				
1	12.37	12.37	13.96	13.07	1	11.22	11.36	16.09	20.12
2	11.22	11.04	10.82	11.79	2	3.00	9.43	7.35	6.71
3	12.37	10.82	3.00	4.24	3	12.37	2.45	2.83	8.48
4	9.00	18.49	4.36	17.49	4	12.00	8.60	4.12	13.42
5	15.59	3.60	14.00	7.35	5	2.45	17.75	9.22	4.24
6	6.71	4.58	9.90	9.00	6	9.05	5.20	10.82	13.42
7	6.00	7.87	19.52	9.00	7	14.07	8.48	13.49	12.37
8	3.00	11.22	2.83	12.37	8	6.71	16.16	4.12	9.95
9	16.15	10.44		7.35	9	9.49	3.00		13.75
10	5.00			8.34	10	5.10			16.43
11	3.60				11	4.24			
DS	9,18	10,05	9,80	10,00	DS	8,15	9,16	8,51	11,89

EA = euklidischer Abstand

RA = Repräsentationsareale

DS = Durchschnitt

GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2



Abbildung 19.10: Vergleich der euklidischen Abstände aller Gruppen. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. EA = euklidischer Abstand; GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2 (eigene Darstellung)

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse zum euklidischen Abstand wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Alle Angaben zur Berechnung des

euklidischen Abstandes können dem Anhang S auf der beigefügten CD entnommen werden.

Neben dem vierfach gestuften Zwischensubjektfaktor „Gruppe“ mit den Abstufungen *K1*, *K2*, *GL* und *D* ergab sich der zweifach gestufte Innersubjektfaktor „Lateralität“ mit den Ausprägungen *euklidischer Abstand der linken Hand* (= EA_li) und *euklidischer Abstand der rechten Seite* (= EA_re).

Der *Haupteffekt* „Gruppe“ wurde nicht signifikant [$F(3,34) = .69, p = .56$]. Das bedeutet, dass zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede bezüglich des euklidischen Abstandes vorlagen.

Für den *Innersubjektfaktor* „Lateralität“ konnte ebenso kein statistisch bedeutsames Ergebnis nachgewiesen werden [$F(1,34) = .13, p = .73$]. Folglich kann man auf fehlende Unterschiede des euklidischen Abstandes bezüglich der Seite (linke versus rechte Hand) schließen.

Die einfache *Interaktion* zwischen dem Innersubjektfaktor „Lateralität“ und dem Zwischensubjektfaktor „Gruppe“ wurde ebenfalls nicht signifikant [$F(3) = .66, p = .58$].

Zusammengefasst wird deutlich, dass bei keiner der vier Gruppen ein signifikanter Unterschied zwischen der Größe der Repräsentationsareale der linken und rechten Hand besteht. Hypothesenkonform ist aber das tendenziell größere Repräsentationsareal der rechten Hand in M1 gegenüber der linken Hand bei der *Kontrollgruppe 2* ($EA_{x/re/K2} = 11.89$; $EA_{x/li/K2} = 10.00$). Für die Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Gehörlose* findet sich dagegen ein tendenziell größeres Repräsentationsareal der linken Hand, was ebenfalls erwartet wurde ($EA_{x/re/D} = 8.51$; $EA_{x/li/D} = 9.80$; $EA_{x/re/GL} = 8.15$; $EA_{x/li/GL} = 9.18$). In diesem Zusammenhang fällt die *Kontrollgruppe 1* auf, die vergleichbare Ergebnisse zu den Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher* und *Gehörlose* zeigt. Diese Kontrollgruppe weist, entgegen der Erwartung, eine größere Repräsentation der nicht-dominanten linken Hand gegenüber der dominanten rechten Hand auf ($EA_{x/re/K1} = 9.16$; $EA_{x/li/K1} = 10.05$).

19.4 Prüfung der Hypothese 13

Zur Veranschaulichung der Verhältnisse der euklidischen Abstände zwischen den Repräsentationsarealen der linken und der rechten Hand bei allen Gruppen wurde der Quotient aus dem euklidischen Abstand (= EA) der linken und dem euklidischen Abstand

der rechten Hand gebildet bzw. zwischen der rechten und linken Hand. Der zuvor aufgestellten Hypothese entsprechend wurde bei den *Gehörlosen* und *Gebärdensprachdolmetschern* für den Quotienten EA links / EA rechts ein Wert ≥ 1 erwartet. Für die *Kontrollgruppen* sollte sich, aufgrund der dominanten, rechten Hand bei demselben Vergleich dagegen ein Wert ≤ 1 zeigen. Tabelle 19.4 zeigt die gebildeten Quotienten aller Versuchspersonen. In Abbildung 19.11 ist dieser Sachverhalt grafisch und anhand der Mittelwerte jeder Gruppe dargestellt.

Tabelle 19.4: Übersicht der Quotienten linke Hand / rechte Hand und rechte Hand / linke Hand

Probandennummer	GL	K1	D	K2	Probandennummer	GL	K1	D	K2
Quotient links/rechts					Quotient rechts/links				
1	1.10	1.09	0.87	0.65	1	0.91	0.92	1.15	1.54
2	3.74	1.17	1.47	1.76	2	0.27	0.85	0.68	0.57
3	1.00	4.42	1.06	0.50	3	1.00	0.23	0.94	2.00
4	0.75	2.15	1.06	1.30	4	1.33	0.47	0.94	0.77
5	6.36	0.20	1.52	1.73	5	0.16	4.93	0.66	0.58
6	0.74	0.88	0.91	0.67	6	1.35	1.14	1.09	1.49
7	0.43	0.93	1.45	0.73	7	2.35	1.08	0.69	1.37
8	0.45	0.69	0.69	1.24	8	2.24	1.44	1.46	0.80
9	1.70	3.48		0.53	9	0.59	0.29		1.87
10	0.98			0.51	10	1.02			1.97
11	0.85				11	1.18			
DS	1,65	1,67	1,13	0,96	DS	1,13	1,26	0,95	1,30

GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe 1, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2
DS = Durchschnitt

In Abbildung 19.11 ist deutlich zu sehen, dass der Quotient linke Hand / rechte Hand bei den *Gehörlosen* und *Gebärdensprachdolmetschern* > 1 ist. Ebenfalls hypothesenkonform ist das Verhältnis bei der *Kontrollgruppe 2*, wo der Wert < 1 die Überlegenheit der rechten Hand anzeigt. Die *Kontrollgruppe 1* weist dagegen einen Quotienten-Wert > 1 auf, was nicht der aufgestellten Hypothese entspricht.

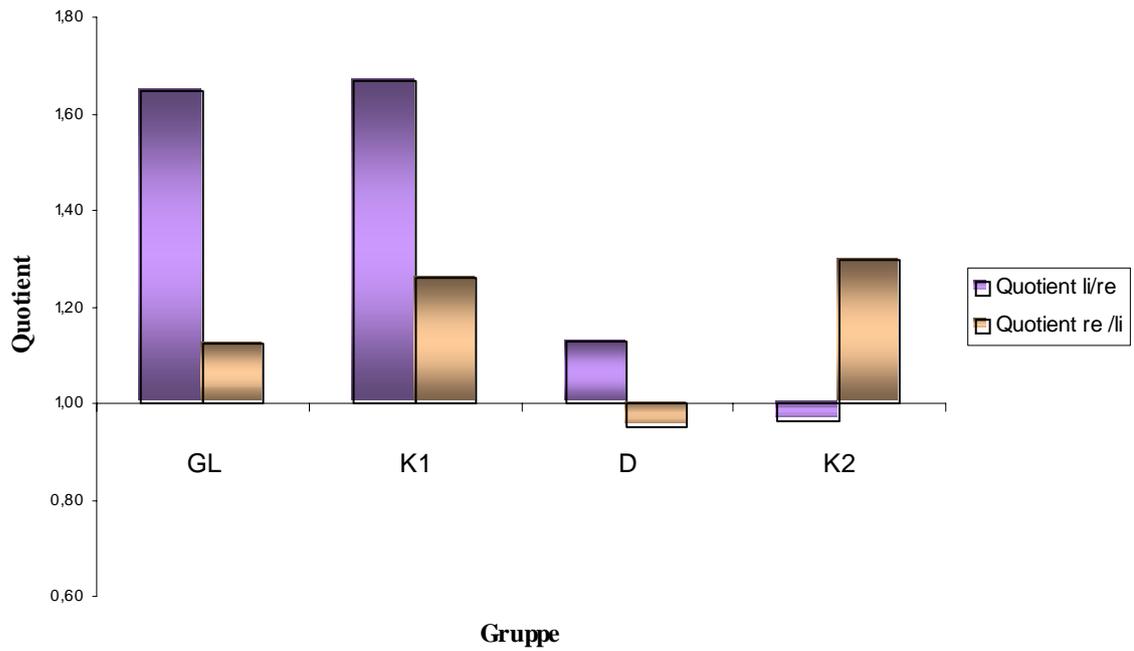


Abbildung 19.11: Vergleich der gebildeten Quotienten zwischen beiden Händen über die Gruppen. li / re = links / rechts ; re / li = rechts / links; GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe 1, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2 (eigene Darstellung)

In Kapitel 20 werden die dargestellten Ergebnisse im Kontext der gegenwärtigen Literatur diskutiert.

20 Diskussion des Motorik-Paradigmas

Bei dem durchgeführten Paradigma und den daraus erhobenen Daten stand die zentrale Frage im Vordergrund, ob die durch das Ausüben von Gebärdensprache extrem gesteigerte motorische Aktivität Einfluss auf die Repräsentationsareale der Hände im primärmotorischen Kortex (M1) hat. Wie in Abschnitt 16.1.1 bereits diskutiert, ist die Auswirkung von erhöhtem motorischem Training auf den motorischen Kortex inzwischen nicht mehr umstritten. Die umfangreiche Plastizität der kortikalen Repräsentation von Bewegungen, die durch Übung bzw. Erfahrung induziert wird, konnte in zahlreichen Studien belegt werden (u.a. vgl. Classen, Liepert, Wise, Hallett & Cohen, 1998). Aufgrund dieser Ergebnisse vermuteten wir, dass die Gruppen *Gehörlose* und *Gebärdensprachdolmetscher*, die ihre Hände täglich über mehrere Stunden hinweg zur Ausübung der Gebärdensprache einsetzen, vergrößerte Handareale in M1 gegenüber nicht-gebärdenden Hörenden aufweisen.

Zunächst konnte mit den Ergebnissen in Abschnitt 19.2 eine leichte Überlegenheit der Größe des rechten Handareals gegenüber dem linken bei der *Kontrollgruppe 2* gezeigt werden (anhand des euklidischen Abstandes). Für Rechtshänder konnte dieses Phänomen, welches auf den verstärkten Einsatz der dominanten Hand im Alltag zurückzuführen ist, bereits häufig nachgewiesen werden (u. a. vgl. Braun et al., 2000; Elbert et al., 1995). Die *Kontrollgruppe 1* weist diese Überlegenheit nicht auf, obwohl alle Versuchspersonen Rechtshänder waren. Es wird gegenwärtig dafür kein Erklärungsansatz geboten. Hypothesenkonform sind dagegen die Ergebnisse für die Gruppen *Gehörlose* und *Gebärdensprachdolmetscher*. Bei beiden Gruppen zeigte sich erwartungsgemäß eine leichte Überlegenheit der linken Hand (siehe Abschnitt 19.2). Diese geringe Ausprägung der Asymmetrie beider Hände könnte auf den bilateralen Einsatz der Hände beim Gebärden zurückgeführt werden. Auch Jäncke, Schlaug und Steinmetz (1997) fanden bei professionellen Pianisten eine reduzierte Asymmetrie der Hände und führten das auf den Anstieg der Fertigungsverbesserung der linken Hand durch das Klavierspielen mit beiden Händen zurück (vgl. Jäncke et al., 1997).

Des Weiteren wurden zur Berechnung der Größe der Repräsentationsareale beider Hände die Anzahl der Voxel sowie der euklidische Abstand zwischen D1 und D5 für beide Hände erhoben. Es ergaben sich keine statistisch bedeutsamen Unterschiede für die Vergleiche *Gehörlose* versus *Kontrollgruppe 1* und *Gebärdensprachdolmetscher* versus

Kontrollgruppe 2. Die erwartete Ausdehnung der Repräsentationsareale für beide Hände durch erhöhten Bedarf dieser Extremitäten konnte nicht bestätigt werden. Bevor Erklärungsansätze für diese Ergebnisse vorgestellt werden sollen, sei darauf hingewiesen, dass sich die Werte für die euklidischen Abstände bei allen Probanden in Bereichen bewegen, die bisher in anderen Studien auch gefunden wurden. Der größte euklidische Abstand der hier untersuchten Probanden (im Durchschnitt einer Gruppe) betrug 11.89 Millimeter; der kleinste 8.15 Millimeter. Dechent & Frahm (2003) fanden in ihrer Studie euklidische Abstände zwischen 7 und 17 Millimetern (vgl. Dechent & Frahm, 2003). Elbert et al. (1995) verwiesen auf Abstände zwischen 5 und 15 Millimetern (vgl. Elbert et al., 1995). Die hier ermittelten euklidischen Abstände sind folglich nicht außergewöhnlich. Allerdings fanden sich nicht die erwarteten signifikant größeren euklidischen Abstände bei den Gebärdensprachnutzern.

Im Folgenden sollen Erklärungen für die fehlenden Mehraktivierungen von *Gehörlosen* und *Gebärdensprachdolmetschern* skizziert werden. Diese verstehen sich lediglich als Vermutungen und als verschiedenartige Ansätze.

20.1 Fehlende Intensität der Hand- und Fingerbenutzung

Es wäre möglich, dass der tägliche Umgang mit der „manuellen Sprache“ als sogenanntes Training nicht intensiv genug ist, um die Repräsentation des Handareals signifikant zu verändern. Vermutlich ist das Gebärden nicht vergleichbar mit täglichen repetitiven Fingerübungen am Klavier oder der Geige. Hier stehen sich holistische Bewegungen und feinmotorische Fingerbewegungen gegenüber.

An dieser Stelle sei darauf aufmerksam gemacht, dass die hörenden *Kontrollgruppen* im täglichen Umgang intensiven Kontakt mit Computern haben. Folglich liegt die Vermutung nah, dass die Personen, die täglich mehrere Stunden am PC sitzen, ihre Handmotorik möglicherweise in vergleichbarer Weise schulen wie Gebärdende im Umgang mit der Gebärdensprache. Aus diesem Grund wurden *post hoc* Fragebögen an alle Versuchspersonen ausgeteilt. Diese erfassten die Dauer der täglichen Nutzung am Computer und die Art der Nutzung.

Die statistische Auswertung erfolgte zunächst mit einer *einfaktoriellen ANOVA*. Mit diesem Vorgehen sollte geklärt werden, ob zwischen den Gruppen signifikante

Unterschiede in der Häufigkeit der Computer-Nutzung (Abstufungen: (a) gar nicht, (b) weniger als eine Stunde pro Tag, (c) zwischen einer und vier Stunden pro Tag, (d) mehr als vier Stunden pro Tag) sowie der Art der Nutzung des Computers (Abstufungen: (a) nichts, (b) spielen, (c) tippen, (d) surfen) vorliegen. Es wurden Unterschiede im Gebrauch der Hände am PC zwischen den Gruppen vermutet. Diese Unterschiede in der Mehrbenutzung der Finger könnten die Ursache für die fehlenden Unterschiede in den Repräsentationen der Handareale zwischen den Gebärdenden und Nicht-Gebärdenden sein. Der Vergleich der Nutzungs-Häufigkeit zwischen den Gruppen zeigte signifikante Unterschiede [$F(3) = 15.36, p < .05$]. Die Art der Nutzung am Computer zeigte dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen [$F(3) = .84, p = .48$]. Im Anschluss erfolgte eine weitergehende Auswertung. Es wurden *T-Tests bei unabhängigen Stichproben* für die gebildeten Gruppenpaare durchgeführt (K1 versus GL; K2 versus D). Für den Vergleich zwischen der Kontrollgruppe 1 und den Gehörlosen bezüglich der Nutzungshäufigkeit des Computers ergab sich ein signifikanter Unterschied [K1-GL: $t(18) = 4.73, p < .016$; *Bonferroni-Korrektur: $p = 0.016$*]. Die Kontrollgruppe 1 nutzte den PC 2,33 Stunden am Tag ($SE = .37$). Die Gehörlosen benutzen den Computer dagegen im Schnitt nur 0,55 Stunden pro Tag ($SE = .16$). Zwischen den Gebärdensprachdolmetschern und der Kontrollgruppe 2 wurde dieser Vergleich der Nutzungs-Häufigkeit nicht signifikant [K2-D: $t(16) = 2.07, p = .06$; K2: $\bar{x} = 2,7$ Stunden, $SE = .67$; D: $\bar{x} = 2,0$ Stunden, $SE = .76$; *Bonferroni-Korrektur: $p = 0.016$*]. Allerdings zeigt sich für diesen Vergleich eine marginale Signifikanz (auf einem α -Niveau von $p < .10$) im Sinne einer empirischen Tendenz. Alle Details zu den in diesem Zusammenhang durchgeführten Tests finden sich in Anhang T auf der beigegefügt CD.

Es wäre folglich möglich, dass sich die Repräsentationsareale der Hände zwischen den Gehörlosen und der Kontrollgruppe 1 nicht unterscheiden, da die Gehörlosen ihre Hände mittels der Gebärdensprache intensiver benutzen, wogegen die hörenden Kontrollpersonen ihre Fingerfertigkeiten durch signifikant häufigere Computer-Nutzung und dem damit verbundenen Tippen mit den einzelnen Fingern schulen.

Das nicht signifikante Ergebnis zwischen den Gebärdensprachdolmetschern und der Kontrollgruppe 2 ist dagegen erwartungsgemäß, da beide Gruppen berufsbedingt ähnlich häufig den Computer nutzen müssen. Folglich kann eine Mehrbenutzung der Hände durch den Computer bei der Kontrollgruppe 2 nicht als Grund für die fehlenden Unterschiede in den Repräsentationsarealen der Hände angeführt werden. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse der Kontrollgruppe 1 bezüglich der Größe der Repräsentationsareale der Finger

nicht auf „Ausreißern“ beruhen, wurde hier nachträglich ein Vergleich zwischen den beiden hörenden Kontrollgruppen durchgeführt. Im Test für die Nutzungshäufigkeit am PC zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen K1 und K2 [K1-K2: $t(17) = -.88$, $p = .39$; *Bonferroni-Korrektur*: $p = 0.016$], was bestätigt, dass die fehlende Überlegenheit der Größe des rechten Handrepräsentationsareals nicht das Resultat unterschiedlicher Voraussetzungen zwischen den hörenden Kontrollgruppen ist.

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das indirekte Training der Fingerfertigkeiten durch häufige PC-Nutzung aller Hörenden eine Ursache dafür sein könnte, dass sich die nicht-gebärdenden Gruppen von den gebärdenden Gruppen bezüglich der Größe der Repräsentationsareale beider Hände auf dem motorischen Kortex nicht signifikant unterscheiden.

20.2 Methodologische Kritik und technische Beschränkungen

An der Ausführung von Gebärdenbewegungen sind zahlreiche Anteile des Oberkörpers beteiligt. Neben Händen und Fingern sind dies unter anderem die Schultern, Oberarme, Ellenbogen und Unterarme. Das bedeutet, dass das Gebärden durch ein komplexes Wechselspiel distaler und proximaler Glieder realisiert wird (vgl. Boyes Bream, 1995). Es ist folglich fraglich, ob eine isolierte Bewegung von Daumen und Kleinem Finger in ausreichendem Umfang die Gebärdenfertigkeit wiedergibt. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Mehrgebrauch der Finger, Hände, Arme, Schultern, Oberkörper, Lippen, Zunge und zahlreicher Gesichtsmuskeln (Mimik) eine Ausdehnung speziell des Handareals verhindert, da alle System um eine Vergrößerung auf dem primären motorischen Kortex konkurrieren. Möglicherweise kommt es im Zuge der Konkurrenz nicht zur Ausbreitung einzelner Systeme, sondern zur Verfeinerung und Präzisierung der Bewegungen. Diese Bewegungspräzision erfasste die hier angewandte Methode allerdings nicht. Bei Profigeigern und Pianisten ist eine Ausbreitung der beanspruchten Handareale allerdings möglich, da diese nicht in Konkurrenz zur Beanspruchung durch andere Körperteile stehen. Vermutlich wäre die Alternative einer erneuten Studie eine komplexe Gebärdenbewegung. Diese erfordert eine gewisse motorische Fertigkeit im Zusammenspiel aller beteiligten Komponenten und wäre für eine nicht-gebärdende Person vermutlich schwerer zu realisieren. In weiterführenden Untersuchungen müsste im Vorfeld eruiert werden, welches Körperteil am häufigsten an der Gebärdenausführung beteiligt ist und

anschließend eine Studie mit verschiedenen Schwierigkeitsstufen einer Bewegung durchgeführt werden. Eine andere Möglichkeit wäre die Untersuchung des Lippen- und Mundareals in M1. Vorstellbar wäre die Veränderung in der Gesichtsrepräsentation, da *Gehörlose* intensiv und punktgenau die Lippen und den Mund bewegen, ohne dabei zu vokalisieren. Das lautlose Mitsprechen der Worte dient der eindeutigen Identifikation der Gebärden.

Ein weiteres Problem könnte die Objektivierung des Handareals mittels fMRT sein. Obwohl D2, D3, D4 mit Klebeband fixiert wurden, kann man deren Kokontraktionen nicht ganz ausschließen. Diese gelegentlich auftretenden synergistischen Koaktivierungen könnten dazu führen, dass überlappende Areale der einzelnen Finger im Handareal aktiv sind und somit eine scharfe Trennung der Finger erschweren.

Auf einen weiteren Aspekt weisen Elbert et al. (1995) hin: die Vergrößerung von Repräsentationsarealen kann sich entgegengesetzt auf die Messung des Abstandes zwischen D1 und D5 auswirken (vgl. Elbert et al., 1995). So wäre es möglich, dass sich zwar die Repräsentationsareale von Daumen und Kleinem Finger vergrößern, sich dadurch aber die signifikanten Schwerpunkte annähern. Das könnte das Fehlen eines signifikanten Gruppenunterschiedes bei der Messung des Abstandes zwischen D1 und D5 erklären. Diese Problematik ist schematisch in Abbildung 20.1 skizziert.

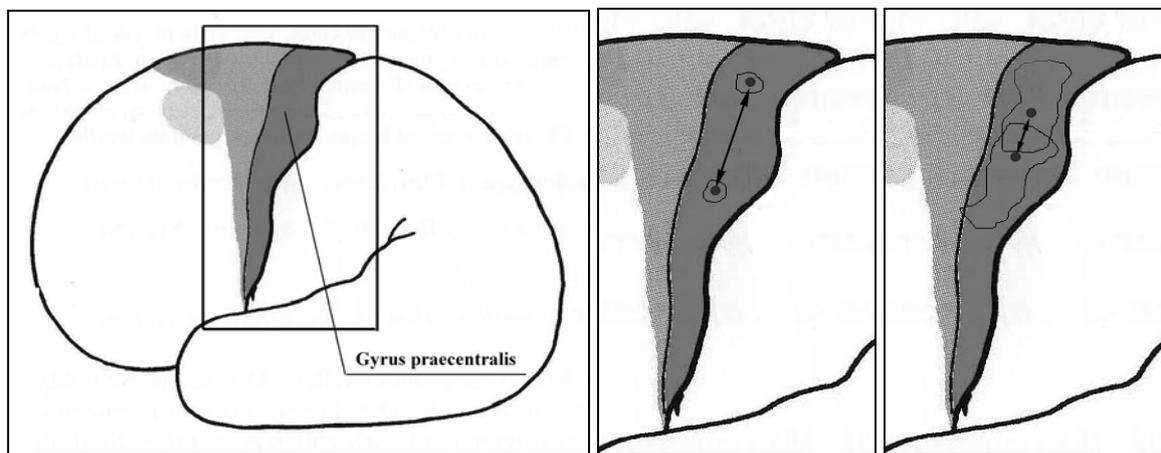


Abbildung 20.1: Zusammenrücken der signifikanten Schwerpunkte bei Ausbreitung von Repräsentationsarealen (dargestellt auf dem Gyrus praecentralis).(eigene Darstellung)

20.3 Automatisierung und Auslagerungen der Aktivierungen

Untersuchungen an Affen von Recanzone, Merzenich, Jenkins, Grajski und Dinse (1992) zeigten, dass die wiederholte, sensorische Stimulation der Fingerkuppen zu einer Ausdehnung des rezeptiven Feldes der Finger in Area 3 sowie zu ausgelagerten Aktivierungen bzw. Ausbreitung der Aktivierungen in andere Bereiche des Gehirnes führte. Die Autoren stellten eine erhöhte Komplexität in der Topografie der stimulierten Finger fest. In Anlehnung an diese Ergebnisse könnte man vermuten, dass solche bereits im Alltag häufig geübten Bewegungen bei *Gehörlosen* und *Gebärdensprachdolmetschern* neben Aktivierungen in M1 eventuell zu zusätzlichen bzw. ausgelagerten Aktivierungen führen. So wäre es möglich, dass es zu zusätzlichen Aktivierungen in BA 6 (= prämotorischer Kortex) sowie zu hohen Mitaktivierungen im primären sensorischen Kortex gegenüber den hörenden Kontrollgruppen kommt. Außerdem darf eine vermutlich hohe Involvierung des sensorischen Kortex (S1) bei der Tappingaufgabe nicht vernachlässigt werden, da die Gelenke, Sehnen und Fingerkuppen beim Ausführen der Aufgabe sensomotorisch beansprucht werden. Die durchgeführte, standardisierte Analyse zur Ermittlung der aktivierten Voxel zeigte, dass zum Teil der Gyrus postcentralis (= sensorisches Feld) bei der geforderten Bewegungsaufgabe mit aktiviert war. Diese Ausbreitung der Aktivierung auf das benachbarte, sensorische Areal wäre eine weitere Möglichkeit für die nicht-signifikanten Ergebnisse zwischen Gebärdenden und Nicht-Gebärdenden.

Die fehlende Mehraktivierung der Gebärdenden lässt sich mit dem Stand der gegenwärtigen Literatur nicht eindeutig erklären. Als spekulativ ist deshalb folgende Vermutung zu verstehen: im Gegensatz zu beispielsweise Schlaganfall-Patienten, deren Mehrgebrauch der Hände während der Therapie plötzlich einsetzt, gebrauchen kongenital *Gehörlose* ihre Hände von Geburt an. Gehörlose zeichnen sich also nicht durch diesen ungewöhnlichen Mehrgebrauch in kurzer Zeit aus. Verglichen mit Schlaganfall-Patienten setzen Gehörlose und Profi-Musiker die Hände im Laufe des Lebens relativ kontinuierlich ein. Im Gegensatz zu Musikern beschränkt sich bei Gehörlosen aber der außergewöhnliche Mehrgebrauch nicht nur auf die Hände, sondern dehnt sich auf den gesamten Oberkörper und das Gesicht aus. Das Problem der damit verbundenen Konkurrenz zwischen den zahlreichen, an der Gebärdensprachbewegung beteiligten Körperteilen ist in Abschnitt 20.2 skizziert.

Es wäre möglich, dass sich der kontinuierliche Einsatz der oberen Gliedmaßen und die damit eben beschriebenen Auswirkungen in vergleichbaren Aktivierungen zu den *Kontrollgruppen* äußern.

Arbeiten zu Automatisierungsprozessen könnten erklären, warum die Cluster mit den höchsten Aktivierungen im primärmotorischen Kortex für die *Gebärdenden* und die *Kontrollgruppe* gleichermaßen lokalisiert wurden. Als automatisiert gelten Bewegungen, die schnell und ohne erkennbare geistige Anstrengung ausgeführt werden können (vgl. Krist, 1995). Vermutlich führen Gehörlose die Bewegungen der Hände während der Ausübung von Gebärdensprache weitestgehend unbewusst aus, da eher Wortbildung und Verständnis im Vordergrund stehen. Folglich denkt ein Gehörloser weniger über die Bewegung, als über das der Bewegung entsprechende Wort nach und die Bewegungen werden unbewusst automatisiert. Geiger und Pianisten führen dagegen ihre Bewegungen am Instrument ganz bewusst aus und lenken ihre Aufmerksamkeit eher auf die Stellung der Finger oder den Abstand zwischen den Tasten. Möglicherweise sind diese Bewegungen dann weniger automatisiert, sondern werden bewusst vorbereitet und ausgeführt. Weiterführend ist Automatisierung durch übungsbedingte Verlagerung von Teilfunktionen auf untergeordnete Steuerungsebenen charakterisiert (vgl. Krist, 1992), was die fehlenden Mehraktivierungen in den betrachteten Arealen (durch Auslagerungen oder durch Automatisierung?) erklären könnte.

20.4 Ökonomisierungs- und Kompensationsprozesse

Eine andere Schwierigkeit in der Darstellung eines größeren Handareals für die Gebärdenden liegt vielleicht in den sehr guten Leistungen dieser Gruppen im Ausführen von Handbewegungen begründet. Je besser die Fähigkeiten der Handleistungen sind, desto mehr nehmen die Aktivierungen in M1 (Handareal) bei Messungen mit fMRT ab. Jäncke, Shah und Peters (2000) untersuchten in diesem Zusammenhang mittels fMRT professionelle Musiker versus Nicht-Musiker. Beide Gruppen mussten bimanuale und unimanuale Tappingaufgaben erfüllen. Erstaunlicherweise zeigten die Berufsmusiker bei den schwierigeren bimanualen Anforderungen deutlich geringere Aktivierungen in den primären und sekundären motorischen Arealen als die Nicht-Musiker. Jäncke et al. (2000) führten diese Ergebnisse darauf zurück, dass das jahrelange Training von Handfertigkeiten

zu einer deutlich größeren Effizienz bei der Ausführung solcher Aufgaben führt. Diese schlägt sich, laut den Autoren, in einer geringeren Anzahl von aktiven Neuronen nieder, die zur Ausführung einer solchen Performance benötigt werden (vgl. Jäncke et al., 2000). Ähnlich könnten die geforderten Hand- und Fingerbewegungen von den Gebärdenden bereits so gut beherrscht werden, dass zur Ausübung einer solchen Bewegung weniger Neuronen aktiviert werden müssen. Vermutlich wird weniger Energie zur Bewältigung einer solchen motorischen Aufgabe benötigt, folglich wären auch weniger neuronale Zellverbände involviert. Hier könnte also ein gewisser Ökonomisierungsprozess eingetreten sein. Desimone (1996) fand bei repetitiven Fingerbewegungen an Makaken ebenfalls heraus, dass neuronale Zellverbände geringer und vermehrt selektiv mit wiederholter Erfahrung bei der Präsentation des gleichen Stimulus feuern (vgl. Desimone, 1996). Komplexere und neue motorische Aufgaben führen dagegen zu einer kompensatorischen Rekrutierung weiterer motorischer Einheiten (vgl. Hutchinson et al., 2002). Für die *Kontrollgruppen* könnte die gestellte Aufgabe ungewohnt sein und somit zu einer höheren Involvierung von motorischen Zellverbänden führen als bei *Gehörlosen* und *Gebärdensprachdolmetschern*.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Literatur zahlreiche Ansätze zur Erklärung der hier erhobenen Ergebnisse zu finden sind. Allerdings kann keine der Vermutungen eindeutig belegt, sondern nur Spekulationen angestellt werden. Aus diesem Grund wären, wie bereits vorgeschlagen, weiterführende Studien zur endgültigen Klärung notwendig: es wäre zum einen möglich, Hörende und Gehörlose komplexe Gebärdenbewegungen ausführen zu lassen. Zum anderen könnte das Lippen- und Mundareal auf dem primären motorischen Kortex zwischen diesen beiden Gruppen untersucht werden. Im Vorfeld weiterer Untersuchungen müssten in jedem Falle genaue Daten bezüglich der an der Ausführung einer Gebärdenbewegung beteiligten Hauptkomponenten erhoben werden.

21 Zusammenfassende Diskussion

Im Folgenden soll eine zusammenfassende Übersicht aller Ergebnisse gegeben werden. Zunächst wird ein Überblick über alle wichtigen Ergebnisse des Bilder-Paradigmas dargestellt (vgl. Tabelle 21.1). Im Anschluss daran wird das aus dem Motorik-Paradigma resultierende Hauptergebnis vorgestellt.

21.1 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Bilder-Paradigmas

Tabelle 21.1: Tabellarische Übersicht der Hypothesen und wichtigsten Ergebnisse des Bilder-Paradigmas für alle vier Gruppen

Gruppe / Hirnareal	formulierte Hypothesen	skizzierte Ergebnisse	Bestätigung der Hypothese	Anmerkungen / Besonderheiten
Gehörlose				
<i>Wernicke-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	5 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese konform	keine Aktivierungen auf die Kategorie <i>Gesten</i>
	bilaterale Aktivierungsmuster	bilaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => hypothese konform	
<i>Broca-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	keine Bedingung aktiviert	nicht hypothese konform	in keiner der sechs Kategorien Aktivierungen
	bilaterale Aktivierungsmuster	keine Aussage möglich	nicht hypothese konform	
<i>ventraler Pfad</i>	hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären für alle sechs Bedingungen	6 v. 6 Bedingungen hoch aktiviert	hypothese konform	
	linkshemisphärische Dominanz in den semantisch dekodierbaren Kategorien (5 v. 6)	linkslaterale Trends in den 5 Bedingungen erkennbar	Lateralität statistisch schwach bedeutsam => schwach hypothese konform	
<i>Gyrus praecentralis</i>	Aktivierungen auf die Kategorien Wörter und Objekte	1 v. 6 Bedingungen vernachlässigbar aktiviert	nicht hypothese konform	
<i>prim. auditiver Kortex</i>	Aktivierungen in allen sechs Bedingungen	2 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese konform	
<i>dorsaler Pfad</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten	vernachlässigbare Aktivierungen in den bewegungsinduzier. Bedingungen	nicht hypothese konform	

Kontrollgruppe 1				
<i>Wernicke-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	4 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese(n)konform	keine Aktivierungen auf die Kategorie <i>Objekte</i>
	linkslateralisiertes Aktivierungsmuster	linkslaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch bedeutsam => hypothese(n)konform	
<i>Broca-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	6 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese(n)konform	
	linkslateralisiertes Aktivierungsmuster	linkslaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch bedeutsam => hypothese(n)konform	
<i>ventraler Pfad</i>	hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären für alle sechs Bedingungen	6 v. 6 Bedingungen hoch aktiviert	hypothese(n)konform	
	linkshemisphärische Dominanz in den semantisch dekodierbaren Kategorien (3 v. 6)	linkslaterale Trends in den 3 Bedingungen erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => nicht hypothese(n)konform	
<i>Gyrus praecentralis</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten (4 v. 6)	6 v. 6 Bedingungen aktiviert	nicht hypothese(n)konform	
<i>prim. auditiver Kortex</i>	keine Aktivierungen	keine Bedingung aktiviert	hypothese(n)konform	
<i>dorsaler Pfad</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten	alle bewegungsinduzier. Bedingungen aktiviert	hypothese(n)konform	Aktivierungen auf die Kategorie <i>Wörter</i>

Dolmetscher

<i>Wernicke-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	6 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese(n)konform	
	bilaterale Aktivierungsmuster	linkslaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch bedeutsam => nicht hypothese(n)konform	
<i>Broca-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	5 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothese(n)konform	keine Aktivierungen auf die Kategorie <i>Gebärden statisch</i>
	bilaterale Aktivierungsmuster	linkslaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch bedeutsam => nicht hypothese(n)konform	
<i>ventraler Pfad</i>	hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären für alle sechs Bedingungen	6 v. 6 Bedingungen hoch aktiviert	hypothese(n)konform	
	linkshemisphärische Dominanz in den semantisch dekodierbaren Kategorien (5 v. 6)	linkslaterale Trends in den 5 Bedingungen erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => nicht hypothese(n)konform	
<i>Gyrus praecentralis</i>	Aktivierungen auf die Kategorien <i>Wörter</i> und <i>Objekte</i>	6 v. 6 Bedingungen aktiviert	nicht hypothese(n)konform	
<i>prim. auditiver Kortex</i>	keine Aktivierungen	keine Bedingung aktiviert	hypothese(n)konform	

<i>dorsaler Pfad</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten	alle bewegungsinduzier. Bedingungen aktiviert	hypothesenkonform	
Kontrollgruppe 2				
<i>Wernicke-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	3 v. 6 Bedingungen aktiviert	schwach hypothesenkonform	keine Aktivierungen auf die Kategorie <i>Wörter</i>
	linkslateralisiertes Aktivierungsmuster	keine Trends bzgl. der Lateralität erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => nicht hypothesenkonform	
<i>Broca-Areal</i>	Aktivierungen in allen Bedingungen, die sie semantisch dekodieren können	5 v. 6 Bedingungen aktiviert	hypothesenkonform	
	linkslateralisiertes Aktivierungsmuster	linkslaterale Trends erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => nicht hypothesenkonform	
<i>ventraler Pfad</i>	hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären für alle sechs Bedingungen	6 v. 6 Bedingungen hoch aktiviert	hypothesenkonform	geringere Aktivierungen auf die Kategorie <i>Wörter</i>
	linkshemisphärische Dominanz in den semantisch dekodierbaren Kategorien (3 v. 6)	linkslaterale Trends in 2 v. 3 Bedingungen erkennbar	Lateralität statistisch nicht bedeutsam => nicht hypothesenkonform	
<i>Gyrus praecentralis</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten (4 v. 6)	6 v. 6 Bedingungen aktiviert	nicht hypothesenkonform	
<i>prim. auditiver Kortex</i>	keine Aktivierungen	keine Bedingung aktiviert	hypothesenkonform	
<i>dorsaler Pfad</i>	Aktivierungen auf die Kategorien mit bewegungsinduzier. Inhalten	alle bewegungsinduzier. Bedingungen aktiviert	hypothesenkonform	

v. = von
 bewegungsinduzier. = bewegungsinduzierenden
 prim. auditiver Kortex = primärer auditiver Kortex
 prim. motorisch. Kortex = primärer motorischer Kortex
 = Ergebnisse sind hypothesenkonform
 = Ergebnisse sind nicht hypothesenkonform
 = Ergebnisse sind nur tendenziell hypothesenkonform
 (Die Farben beziehen sich auf die Hypothesen zur Aktivierung und nicht zur Lateralität)

In der Tabelle 21.1 sind die Hypothesen und wichtigsten Ergebnisse des Bilder-Paradigmas tabellarisch zusammengefasst. Die Aktivierungen werden im Folgenden separat nach Gruppen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den Hypothesen 1 bis 10 bezüglich der sechs untersuchten Hirnareale beurteilt.

Gehörlose

Hinsichtlich der Aktivierungen in den klassischen Arealen Wernicke und Broca zur Sprachverarbeitung wurden für alle Gruppen Aktivierungen für die Kategorien erwartet, die der jeweiligen Gruppe bekannt waren (Hypothese 1 und 3). Für die Gehörlosen konnte die Hypothese 1 bezüglich des *Wernicke-Areals* bestätigt werden, da die Aktivierungen die postulierte Verarbeitung der Gebärdensprache in den klassischen Spracharealen der linken Hemisphäre unabhängig von der Modalität bestätigen (vgl. Bellugi & Klima, 1991; Neville et al., 1997; Poizner et al., 1990). Die Annahme (Hypothese 2), dass die Aktivierungen im Wernicke-Areal durch den Gebrauch einer visuell-räumlichen Sprache bilaterale Verteilungen zeigen (vgl. Bavelier et al., 1998b; Neville et al., 1998) konnte ebenso angenommen werden.

Überraschenderweise und entgegen der Erwartung zeigte die auditiv deprivierte Gruppe keine Aktivierungen im *Broca-Areal* auf die sechs Kategorien. Diese Ergebnisse stimmen nicht mit den Vorgaben der Hypothese 3 überein, in der die modalitätsunabhängige Sprachverarbeitung durch interne Sprachproduktion für alle bekannten Kategorien postuliert wurde. In der Diskussion wurden für die fehlenden Aktivierungen zwei mögliche Erklärungsansätze vorgestellt (vgl. Kapitel 7.2.2). Zum einen könnten die Aufgabenstellung, die das aktive Nachahmen der Gebärden oder das Aussprechen der Wörter untersagte sowie die fehlende repetitive und lang andauernde Darbietung der Stimuli und die geringe Anforderung an kognitive Verarbeitung Ursachen für dieses Ergebnis sein. In diesem Fall wird das Broca-Areal als modalitätsunabhängig-agierendes Areal nicht in Frage gestellt. Zum anderen wurde von Horwitz et al. (2003) herausgefunden, dass ein Teil des Broca-Areals vermutlich modalitätsabhängig innerviert wird. Da die Gehörlosen in einer anderen Modalität Sprache wahrnehmen (visuell) als die Hörenden (akustisch) wäre es denkbar, dass dieser modalitätsabhängige Teil des Broca-Areals verantwortlich ist für die fehlenden Aktivierungen. Ich denke, dass die erste Erklärung plausibler für das hier vorgestellte Ergebnis ist, und methodologische Schwachpunkte zu diesem Ergebnis geführt haben, weswegen weiterführende Studien an dieser Stelle angebracht sind. Es ist denkbar, dass die Aufgabenstellung bei den hier untersuchten Gehörlosen zu einem anderen Verarbeitungsweg der Bilder geführt hat, der das Broca-Areal nicht involviert. Zur Hypothese 4 bezüglich der Verteilungen der Aktivierungen konnte aufgrund fehlender Daten infolgedessen keine Aussagen gemacht werden.

Für die Objektdiskriminierung, die bezüglich aller Bedingungen vermutlich automatisch von allen Gruppen durchgeführt werden muss, um den Bildern relevante Informationen zur korrekten Aufgabenbewältigung entnehmen zu können, wurden bilaterale und hohe Aktivierungen im *ventralen Pfad* erwartet, der maßgeblich an der Wahrnehmung von Objektmerkmalen beteiligt ist (Hypothese 5). Die hohen Aktivierungen der Gehörlosen auf alle sechs Kategorien bestätigen die aufgestellte Hypothese. Außerdem wurde postuliert, dass sich auf die fünf semantisch dekodierbaren Kategorien dennoch eine linkshemisphärische Dominanz der Aktivierungen zeigt, da den sozialen Signalen zusätzlich semantische Informationen entnommen werden können (vgl. McCullough et al., 2005). Tendenziell konnte sich diesbezüglich die Hypothese 6 bestätigen lassen, auch wenn die statistische Prüfung der Lateralitätsmuster statistisch nicht bedeutsam wurde. Es sei darauf hingewiesen, dass hier die Werte der mittleren Voxelanzahlen aus den Tabellen herangezogen werden, um Fragen zur Lateralität zumindest tendenziell beurteilen zu können, da einige der statistischen Tests durch Ausreißer-Werte nicht signifikant wurden. Bei reiner Interpretation der Statistik entsteht ein verzerrtes Bild bezüglich der grundsätzlichen Verteilungen aller Aktivierungen bei den Gruppen.

Im Gegensatz zu den hörenden Kontrollgruppen wurde für die Gebärdensprachnutzer bezüglich des *Gyrus praecentralis* erwartet, dass die Gebärdenbilder in das entsprechende Wort umgewandelt werden. Im Gegensatz dazu werden dargebotene Wörter und Bilder von Alltagsgegenständen vermutlich in die entsprechende Gebärde überführt, was zu den erwarteten Aktivierungen im *Gyrus praecentralis* führen sollte, da das internale Nachahmen von Bewegungen Aktivierungen in diesem Areal hervorruft (Hypothese 8). Die Gruppe der Gehörlosen zeigte keine Aktivierungen im untersuchten Areal, womit das Resultat nicht hypothesenkonform ist. Es könnten Aktivierungen in anderen Arealen des Gehirnes eine Erklärung für dieses Ergebnis sein. In weiterführenden Untersuchungen müssten meines Erachtens dann in supplementär motorischen Arealen bzw. im prämotorischen Areal nach Aktivierungen bezüglich dieser Stimuli-Kategorien gesucht werden.

Die Aktivierungsmuster im *primären auditiven Kortex* sind dagegen hypothesenkonform. In der Hypothese wurde erwartet, dass die Gehörlosen durch die Deprivation des auditiven Kortex Aktivierungen in diesem Areal bei der Verarbeitung visueller Stimuli zeigen (Hypothese 9). Die hier gefundenen Ergebnisse stimmen mit der gegenwärtigen Literatur überein, die für diese Aktivierungen folgende Erklärung gefunden haben: der primäre auditive Kortex wird trotz seiner Deprivation aufgrund von kortikalen

Reorganisationsprozessen und der Plastizität der auditiven Areale für die Verarbeitung visueller Stimuli benutzt (vgl. Bavelier & Neville, 2002; Finney et al., 2001) und zeigt infolgedessen Aktivierungen auf die hier dargebotenen Bilder. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stützen und replizieren die Ergebnisse zahlreicher Studien zu diesem Thema. Es sei angemerkt, dass sich die erwarteten Aktivierungen nicht bei allen Kategorien zeigen. Geringere Anstrengung bei der visuellen Wahrnehmung einiger Kategorien und des damit verbundenen mangelnden Nutzungsbedarfs eines fremden Areals könnte eine Erklärung für dieses Ergebnis sein.

Für die Aktivierungen im *dorsalen Pfad* zeigten sich entgegen der Erwartungen und der dazu formulierten Hypothese vernachlässigbar geringe Aktivierungen. Von diesen geringen Aktivierungen kann abgesehen werden, wenn man diese in Relation zu den hohen der anderen Gruppe betrachtet. In Hypothese 10 wurde formuliert, dass Aktivierungen durch interne Nachahmung von Bewegungen im dorsalen Pfad für die Gruppe der Gehörlosen für all jene Kategorien erwartet werden, in denen bewegungsinduzierende Elemente enthalten sind. Entgegen den bisherigen Resultaten der Literatur (u. a. Buccino et al., 2004), zeigten die hier untersuchten Gehörlosen nicht die erwartete Zerlegung der bewegungsrelevanten Bestandteile und die daraus resultierenden Aktivierungen durch interne Bewegungsvorstellung (die Diskussion der Ergebnisse bezieht sich auf die Kategorie *Gebärden mit Pfeil*, da diese die meisten bewegungsrelevanten und bewegungsinduzierenden Merkmale enthält). Es sollen an dieser Stelle noch einmal kurz aufgestellte mögliche Erklärungen für das nicht hypothesenkonforme Ergebnis genannt werden. Es wäre meiner Meinung nach denkbar, dass die Gehörlosen durch den lebenslangen Gebrauch einer räumlich-visuellen Sprache ihre visuellen Fertigkeiten verbessern und dadurch leichter einzelne Komponenten eines visuell dargebotenen Stimulus wahrnehmen können. Diese geringere Anstrengung könnte zu fehlenden Aktivierungen im dorsalen Pfad bei der Wahrnehmung führen. Als weitere Erklärung bestände die Möglichkeit, dass die Gehörlosen einen anderen Verarbeitungsweg bei der Wahrnehmung solcher Gebärdenbilder aufweisen. Im Gegensatz zu den hörenden Kontrollgruppen wäre es möglich, dass die sofortige Dekodierung in ein Wort (was den Kontrollgruppen aufgrund fehlender Gebärdensprachkompetenz nicht möglich ist) dazu führt, dass nur die Areale aktiviert werden, die der Wortverarbeitung dienen. Es sei zusätzlich angemerkt, dass die Studien, zu denen die Ergebnisse dieser Untersuchung im Kontrast stehen, mit anderem Stimulusmaterial gearbeitet haben und dies auch eine Ursache für die fehlende Übereinstimmung der Ergebnisse mit diesen anderen Studien sein

könnte. Die Ansätze sind spekulativ und nach meinem Dafürhalten könnte ein von den hörenden Personen abweichender Verarbeitungsweg von Bildern mit bewegungsrelevanten Inhalten, die in eine vertraute Bedeutung münden, eine Erklärung für die fehlenden Aktivierungen im dorsalen Pfad sein. Diese Annahme wird meiner Meinung nach durch die besseren visuellen Fertigkeiten der Gehörlosen gegenüber Hörenden und die dadurch leichtere Diskriminierung (geringere Anstrengung) von visuellen Stimuli unterstützt.

Kontrollgruppe 1, Gebärdensprachdolmetscher und Kontrollgruppe 2

Um unnötigen Wiederholungen vorzubeugen werden die drei hörenden Gruppen in einem gemeinsamen Abschnitt diskutiert, da ihre Ergebnisse bezüglich der aufgestellten Hypothesen häufig vergleichbar sind.

Wie schon für die Gruppe der Gehörlosen beschrieben, wurden für alle Gruppen Aktivierungen in den klassischen Arealen zur Sprachverarbeitung postuliert. In Hypothese 1 und 3 ist nachzulesen, dass für alle Gruppen Aktivierungen im Wernicke- und Broca-Areal für die Bedingungen erwartet werden, die der jeweiligen Gruppe bekannt sind. Diese Aktivierungen sind unabhängig von der Modalität der erlernten Muttersprache (vgl. Bellugi & Klima, 1991; Neville et al., 1997; Poizner et al., 1990). Für alle drei Gruppen kann die Hypothese 1 bezüglich des *Wernicke-Areals* bestätigt werden, was darauf hindeutet, dass die jeweils bekannten Kategorien auch semantisch verarbeitet wurden und dass hier klassische Sprachverarbeitung stattgefunden hat. Es wird darauf aufmerksam gemacht, dass die Kontrollgruppe 2 nur schwache Aktivierungen in diesem Areal aufweist, die ich aber als hypothesenkonform deute. Ich vermute, dass die tendenziell hypothesenkonformen Aktivierungen bei wiederholter Messung mit einer höheren Anzahl von Stimuli pro Bedingung bestätigt werden können, da es keinen mir bekannten Grund gibt anzunehmen, dass Sprachverarbeitung bei der hörenden Kontrollgruppe außerhalb der klassischen Sprachareale oder gar nicht stattfindet. Außerdem ist anzumerken, dass bei jeder Gruppe je eine Kategorie keine Aktivierungen aufweist, obwohl sie der Gruppe bekannt waren. Ich habe gegenwärtig keinen plausiblen Erklärungsansatz dafür.

Die Ergebnisse im *Broca-Areal* sind ebenfalls für alle drei Gruppen hypothesenkonform und belegen somit die Verarbeitung der Stimuli und die damit zusammenhängende Sprachproduktion. Von der stattgefundenen Sprachproduktion kann aufgrund der signifikanten Aktivierungen ausgegangen werden, was die gegenwärtige Literatur

unterstützt, dass auch internal ausgeführte Sprachproduktion zu Aktivierungen im Broca-Areal führt (vgl. Bellugi & Klima, 1991; Neville et al., 1997; Poizner et al., 1990). Eine weitere Anmerkungen zu den Aktivierungen im Wernicke- und Broca-Areal bezieht sich auf signifikante Aktivierungen in Kategorien, für die ich keine Aktivierungen erwartet hatte, da diese Kategorien der jeweiligen Gruppe unbekannt waren und ich somit von fehlenden semantischen Dekodierungsprozessen und Sprachverarbeitung ausgegangen war (z. B. Gebärdenbilder für die Kontrollgruppen). Diese zusätzlichen Aktivierungen lassen sich mit frei assoziierten Wörtern bzw. Wortsuche erklären, die jeweils in die unbekannt Bilder hineininterpretiert wurden. Sowohl das Wernicke-Areal als auch das Broca-Areal werden unabhängig von der Richtigkeit der imaginierten Bedeutung initiiert, was diese Aktivierungen sinnvoll erklärt.

Für die beiden Kontrollgruppen kann die Erwartung von linkslateralisierten Aktivierungsmustern in den klassischen Spracharealen (Hypothese 2 und 4) anhand der Voxelanzahlen zumindest tendenziell bestätigt werden und die Annahme der Literatur gestützt werden, dass Sprachverarbeitung in der linken, sprachdominanten Hemisphäre stattfindet (vgl. Poizner et al., 1990; List, 1991; Neville et al., 1998). Die Hypothesen 2 und 4 bezüglich der Lateralität postulierten für Gebärdensprachdolmetscher dagegen bilaterale Aktivierungsmuster, da in der Literatur mehrfach gefunden wurde, dass der Gebrauch einer visuell-räumlichen Sprache zu solchen Mustern führt und die rechte Hemisphäre, die unter anderem für die Verarbeitung räumlicher Merkmale verantwortlich ist, in die Verarbeitung von Gebärdensprache in stärkerem Maße als bei der Lautsprache involviert ist (vgl. Bavelier et al., 1998b; Neville et al., 1998). Die Gebärdensprachdolmetscher wiesen entgegen dieser Erwartung ebenfalls linkslateralisierte Aktivierungen auf. Daher lautet eine Vermutung für die nicht hypothesenkonformen Aktivierungen, dass bei den Dolmetschern die Gebärdensprachkompetenz nicht ausreicht, um das typische linkslateralisierte Aktivierungsmuster der klassischen Sprachverarbeitung zu verändern. Ich vermute, dass ein häufigerer Gebrauch als der eines beruflich bedingten nötig ist, um Aktivierungen in beiden Hemisphären zu forcieren. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Verarbeitungsstrategien der Gebärdensprachdolmetscher bei den dargebotenen Stimuli eher mit denen der hörenden Kontrollgruppen vergleichbar sind als mit denen der Gehörlosen. So kann vermutet werden, dass die auditive Deprivation größeren Einfluss auf die zerebrale Verarbeitung der dargebotenen Stimuli hat, als der erlernte Gebrauch einer Gebärdensprache.

In Bezug auf die Aktivierungen im *ventralen Pfad* wurde erwartet, dass alle Gruppen hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären dieser Struktur aufweisen sowie eine erkennbare linkshemisphärische Dominanz auf die Kategorien, die semantisch dekodierbar waren (Hypothese 5 und 6). Die Aktivierungen der drei Gruppen bestätigten die aufgestellte Hypothese, dass die Diskriminierung von Objekten hohe Aktivierungen in beiden Hemisphären hervorruft. Diese Daten belegen, dass die drei Gruppen alle dargebotenen Stimuli wahrgenommen haben und in ihre Bestandteile (Farbe, Form, Gesichtsausdruck) zerlegt haben. Die erwarteten höheren Aktivierungen in der linken Hemisphäre auf die bekannten Kategorien (Hypothese 6) konnte zumindest tendenziell anhand der gemittelten Voxelanzahlen bestätigt werden, auch wenn die entsprechenden statistischen Tests teilweise nicht bedeutsam wurden. Diese höheren Aktivierungen in der linken Hemisphäre auf diese Kategorien sprechen dafür, dass neben den zu diskriminierenden Merkmalen die semantische Bedeutung der Stimuli wahrgenommen wurde.

Im *Gyrus praecentralis* zeigten sich entgegen der aufgestellten Hypothese 7 und 8 Aktivierungen in fast allen sechs Kategorien für jede der drei Gruppen. Postuliert wurden dagegen aber nur Aktivierungen in den bewegungsinduzierenden Kategorien für die Kontrollgruppen 1 und 2 und Aktivierungen für *Wort* und *Gesten* bei den Gebärdensprachdolmetschern. Bei den Kontrollgruppen wird erwartet, dass die Nachahmung der dargebotenen bewegungsinduzierenden Informationen den primären motorischen Kortex aktiviert (Hypothese 7). Diese Vermutung entstand durch die Resultate der Literatur, in der mehrfach bewiesen wurde, dass der Gyrus praecentralis bei der Beobachtung von passiven und aktiven Bewegungen durch andere Personen aktiviert wird (vgl. Aziz-Zadeh, Maeda, Zaidel, Mazziotta & Iacoboni, 2002; Johnson-Frey et al., 2003). Nach meiner Meinung müssten die Gebärdensprachdolmetscher die dargebotenen Wörter und Bilder von alltäglichen Gegenständen internal in die entsprechende Gebärde überführen, was aufgrund der Bewegungsvorstellung ebenfalls zu Aktivierungen im primären motorischen Kortex führt (Hypothese 8). Die Aktivierungen in allen Kategorien der drei Gruppen werden als mit den Erwartungen der Hypothese nicht übereinstimmende Aktivierungen festgelegt. Die Ergebnisse geben Anlass zur Vermutung, dass bei den drei Gruppen die internale Sprachproduktion die Aktivierungen dominiert und nicht die Bewegungsvorstellung bzw. -nachahmung. Nach Meinung der Literatur innerviert auch die Vorstellung des Aussprechens eines Wortes die Muskeln für den Sprechapparat, was zu Aktivierungen im primären motorischen Kortex führt. Diese Begründung ist im Zusammenhang meiner Ergebnisse allerdings nur als spekulativ anzusehen, da ich die

Koordinaten der einzelnen Schwerpunkte der Aktivierungen nicht auf die Lage im primären motorischen Kortex hin untersucht habe. Das vergleichbare Muster der Aktivierungen zwischen den Gebärdensprachdolmetschern und den Kontrollgruppen im Gegensatz zu den fehlenden Aktivierungen der Gehörlosen unterstützt meine Vermutung, dass die Verarbeitung der Stimuli zwischen den drei hörenden Gruppen vergleichbar sind und sich die Dolmetscher trotz ihrer Gebärdensprachkenntnisse eher wie die Kontrollgruppen in den Verarbeitungsmustern darstellen.

Die Hypothese 9, in der postuliert wurde, dass die drei hörenden Gruppen keine Aktivierungen im *primären auditiven Kortex* (A1) aufweisen, konnte für alle Gruppen bestätigt werden. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da sich die Aktivierungen im A1 während der Baseline gegen die Aktivierungen im A1 während der Darbietung der Bedingungen herausmitteln.

Die letzte Hypothese des Bilderparadigmas bezieht sich auf den dorsalen Pfad. Für diese Struktur wurden Aktivierungen aller Gruppen in all den Kategorien erwartet, die bewegungsrelevante Merkmale enthielten (Hypothese 10). Dem dorsalen Pfad werden Funktionen zugeschrieben, die die Wahrnehmung von Handstellungen und Bewegungen im Raum betreffen sowie Stellung der Hände zueinander und andere die Bewegung betreffende Informationen (vgl. Birbaumer & Schmidt, 2003). Der Nachweis von Spiegelneuronen im dorsalen Pfad führt nach Meinung der gegenwärtigen Literatur dann zu Aktivierungen im dorsalen Pfad durch Nachahmung der Bewegungen (vgl. Buccino et al., 2004). Die drei hörenden Gruppen weisen hohe Aktivierungen auf die Kategorien auf, die bewegungsrelevante Informationen enthielten. Bei allen Gruppen waren die Aktivierungen für die Kategorie *Gebärden mit Pfeil* am höchsten. Diese enthält die meisten Informationen, die in Bezug auf Aktivierungen im dorsalen Pfad von Interesse sind. Ich vermute, dass die hypothesenkonformen Aktivierungen der Kontrollgruppen im dorsalen Pfad durch Nachahmung der gesehenen, angedeuteten Bewegungselemente entstehen. Da diese beiden Gruppen die Bedeutung der Gebärdensprachbilder nicht verstanden, versuchten sie sich vermutlich durch Nachahmung eine adäquate Bedeutung zu erschließen. Die Gebärdensprachdolmetscher zerlegen diese Informationen vermutlich gleichermaßen, allerdings mit dem Ziel, die korrekte Wortbedeutung zu entschlüsseln. Beide Prozesse führen meines Erachtens zu den gefundenen hohen Aktivierungen im dorsalen Pfad, die auf eine erhöhte Anstrengung bei der Diskriminierung deuten.

Die zusammenfassende Diskussion legt deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen bei der Verarbeitung der dargebotenen Stimuli dar. In **Abbildung 21.1** sind anhand schematischer Zeichnungen alle aktivierten und nicht aktivierten Areale der vier Gruppen im Überblick zu sehen.

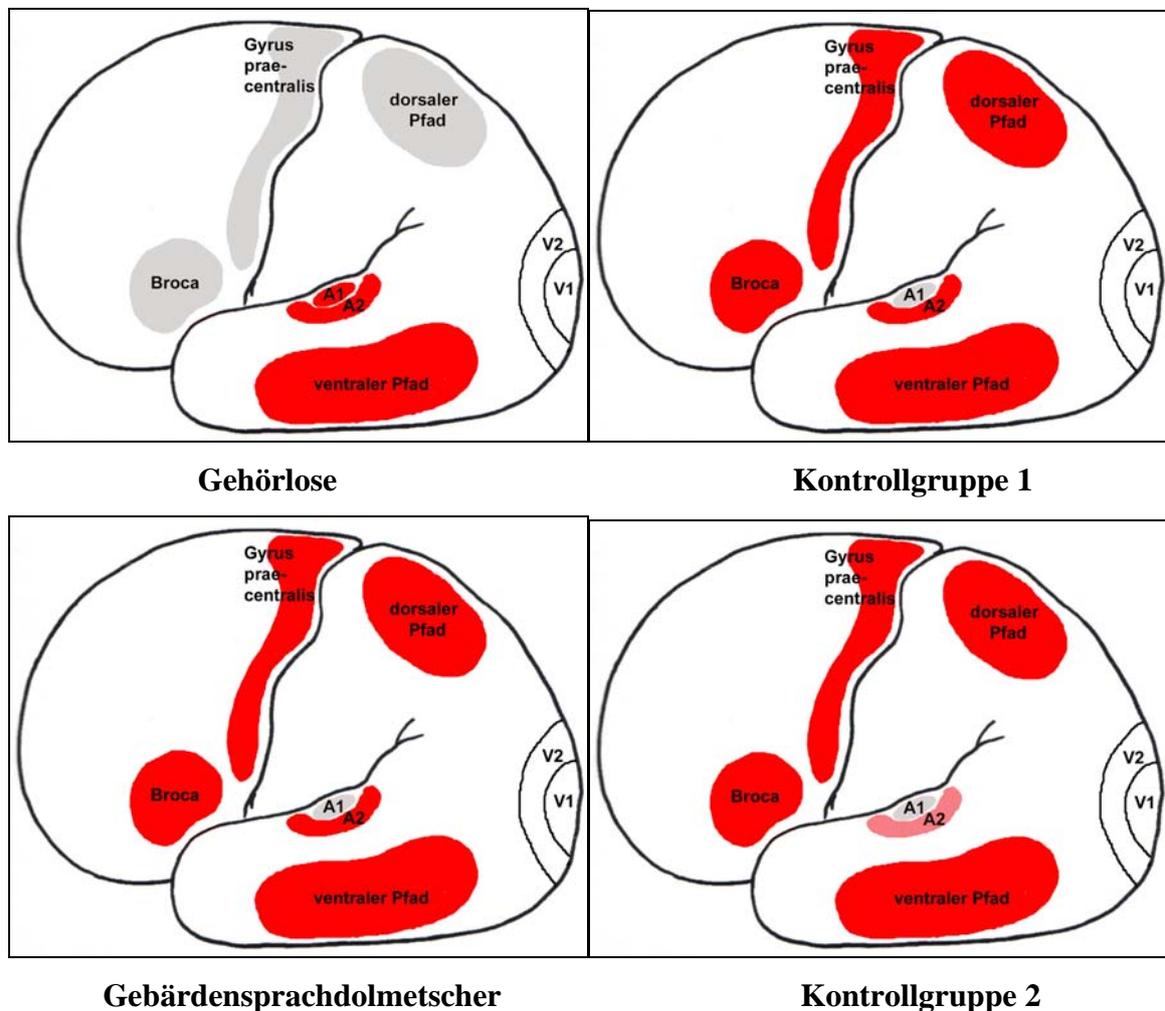


Abbildung 21.1: Schematische Darstellung aktivierter und nicht aktivierter Hirnareale der vier Gruppen. Dargestellt sind die sechs Hirnareale, die hypothesengeleitet untersucht wurden.

Anmerkungen:

rote Areale	=	Aktivierungen
graue Areale	=	keine Aktivierungen
rosa Areale	=	sehr schwache Aktivierungen

Wie schon häufiger angedeutet, sind für die Gebärdensprachdolmetscher vergleichbare Aktivierungsmuster bei der Verarbeitung der dargebotenen sprach- und bewegungsrelevanten, visuellen Stimuli zu den beiden hörenden Kontrollgruppen zu finden. Diese drei Gruppen grenzen sich deutlich von den Aktivierungsmustern der Gehörlosen bei der Verarbeitung der gleichen Stimuli ab. Daraus kann der vorsichtige

Schluss gezogen werden, dass der Gebrauch und die Kompetenz der Gebärdensprache bei den hier untersuchten Gebärdensprachdolmetschern vermutlich nicht zu Veränderungen in den zerebralen Verarbeitungsprozessen führt, da es sonst in vergleichbaren Aktivierungsmustern zwischen Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetschern ersichtlich wäre. Trotz einiger Ergebnisse, die im Kontrast zu den anfangs aufgestellten Hypothesen stehen, ließen sich in den meisten Fällen sinnvolle Erklärungen für diese Muster finden, die sich zu einem neuen Bild der Verarbeitung von bewegungsrelevanten Stimuli zusammenfügen. Es fällt auf, dass die größten Unterschiede in den Arealen bestehen, die in irgendeiner Weise an der Verarbeitung von bewegungsrelevanten Merkmalen beteiligt sind. Die Hauptunterschiede betreffen die Aktivierungsmuster aller Gruppen in den Hirnstrukturen *Broca-Areal*, *Gyrus praecentralis* und *dorsaler Pfad*. Unabhängig von den postulierten Hypothesen weisen die Gehörlosen in diesen drei Arealen keine bzw. vernachlässigbar geringe Aktivierungen auf. Konträr dazu sind die hörenden Gruppen in diesen Strukturen aktiviert. Mögliche Begründungen für diese divergenten Aktivierungsmuster zwischen den Gruppen wurden bereits diskutiert. Meiner Meinung nach stellt sich für die Gehörlosen ein anderer Verarbeitungsweg für die Stimuli dar, die bewegungsbezogene Informationen enthalten als für die hörenden Gruppen. Ich vermute, dass die auditiv Deprivierten bei der Verarbeitung der Gebärdenbilder den „semantischen Weg“ gehen, das heißt, ihnen steht nach relativ kurzer Zeit durch effiziente und ökonomische, visuelle Diskriminierung sofort die semantische Bedeutung der dargebotenen Bilder zur Verfügung. Folglich benötigen sie die Areale nicht, die an der Verarbeitung von Bewegungen beteiligt sind, sondern ihr Verarbeitungsweg endet vielleicht schon im Wernicke-Areal nach erfolgreicher Dekodierung aller Merkmale in das gewünschte Wort. Diese Möglichkeit könnte ein Erklärungsansatz für die fehlenden Aktivierungen im Gyrus praecentralis und dorsalen Pfad darstellen. Es erscheint durchaus sinnvoll, dass der dorsale Pfad nicht benötigt wird, da das millisekundenschnelle Erfassen der wichtigsten Informationen diesen nicht aktiviert. Die fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal sind nach meinem Dafürhalten auf die Aufgabenstellung während der Untersuchung zurückzuführen oder die Anstrengung war für Aktivierungen zu gering. Den hörenden Kontrollgruppen waren die Gebärdenbilder dagegen gänzlich unbekannt. Folglich gelang es ihnen nicht, spontan die richtige Bedeutung hinein zu interpretieren. Aus diesem Grund erscheint es logisch, dass diese Gruppen die Bilder zu begreifen versuchten, indem sie die Bilder in deren einzelne Bestandteile zerlegten. Durch internes Nachahmen der einzelnen Bewegungselemente wird vermutlich die Chance größer, einen

logischen Bezug zu einem vertrauten Inhalt herzustellen. Die intensive Auseinandersetzung mit den Bildern zeigt sich dann in den hohen Aktivierungen im dorsalen Pfad und dem Gyrus praecentralis. Da die Aktivierungsmuster der Gebärdensprachdolmetscher vergleichbar zu denen der eben beschriebenen Kontrollgruppen sind, muss vermutlich auch diese Gruppe die dargestellten Gebärden in seine Bestandteile zerlegen, um sie lexikalisch eindeutig zuordnen zu können. Der Unterschied zu den Kontrollgruppen ist die abschließende, erfolgreiche Zuordnung der Bilder zu einem Wort. Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den vier hier untersuchten Gruppen werfen eine Reihe von Fragen auf, die in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden könnten. Mögliche Ansätze für weiterführende Studien sollen in Kapitel 22 gegeben werden.

21.2 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Motorik-Paradigmas

Für die Daten bezüglich des Motorik-Paradigmas wurden drei Hypothesen formuliert (vgl. Kapitel 17). Diese können jedoch zu einer hauptsächlichen Aussage zusammengefasst werden: es wurde erwartet, dass die Mehrbenutzung beider Hände bei den Gehörlosen zu einer größeren Repräsentation der Hände auf dem primären motorischen Kortex führen. Die Repräsentationsareale der Hände sollten bei den Gebärdensprach-Nutzern signifikant größer sein als bei den Gruppen, die keine Gebärdensprache gebrauchen. Zahlreiche Forschergruppen konnten anhand von Untersuchungen an Berufsmusikern, Braille-Lesern und Verletzten bereits nachweisen, dass veränderte sensorische Erfahrungen oder der Mehrgebrauch von Extremitäten zu kortikalen Reorganisationsprozessen im primären motorischen Kortex führen können. Der Mehrgebrauch kann in der Folge dann zu signifikant vergrößerten Repräsentationen des mehrgebrauchten Körperteiles gegenüber Personen führen, die diesem Mehrgebrauch nicht ausgesetzt sind (vgl. Elbert et al., 1995; Sterr et al., 1998a; Pantev et al., 2000; Weiss et al., 2000; Weiss et al., 2004).

Die Ergebnisse bestätigen die aufgestellte Hypothese nicht. Es zeigten sich für die Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher nicht die erwartete Vergrößerung der Handrepräsentationen gegenüber den Nicht-Gebärdenden Kontrollgruppen. Die erwarteten Mehraktivierungen im Gyrus praecentralis zugunsten der beiden erstgenannten Gruppen bleiben aus. Es sollen im Folgenden noch einmal kurz die Gründe für die mangelnde

Übereinstimmung dieser Daten mit denen der Literatur und der formulierten Hypothese dargestellt werden.

Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass der Gebrauch der Hände in der gebärdensprachlichen Kommunikation nicht ausreicht, um die Repräsentationsareale nachhaltig zu vergrößern. Außerdem konnte anhand nachträglicher Befragungen statistisch belegt werden, dass die Kontrollgruppen ihre Finger im täglichen Umgang mit dem PC signifikant häufiger einsetzten als die Gehörlosen. Die Fingerübungen der Hörenden am Computer könnten die Effekte des Mehrgebrauchs der Gehörlosen mindern. Des Weiteren wäre es denkbar, dass die Vergrößerung des Handareals dadurch unterdrückt wird, dass bei einer Gebärdensprachbewegung auch die Ober- und Unterarme, Lippen, Gesichtsmuskeln und der Oberkörper stärker beansprucht werden und sich vermutlich auch im M1 ausdehnen. Die hier verwendete Methode schränkt eine noch genauere Datenauswertung zudem ein. Somit konnten keine exakten Aussagen darüber gemacht werden, welchem Körperteil die gefundenen Aktivierungen wirklich zuzuordnen sind. Die für mein Verständnis plausibelsten Erklärungen bieten die Ansätze, dass die Gebärdensprachbewegungen der Gehörlosen auf einem hohen Niveau automatisiert und ökonomisch ausgeführt werden. Hier liegt die Vermutung nah, dass die gestellte Aufgabe die Gebärdenden zu wenig forderte und es infolgedessen zu keinen Aktivierungen im gewünschten Areal kommt, wie andere Autoren auch schon an Profimusikern und Affen nachweisen konnten (vgl. Desimone et al., 1996; Jäncke et al., 2000). Weitere mögliche Erklärungen sind vermutete Auslagerungen der Aktivierungen in andere Areale oder kompensatorische Aktivierungen in zusätzlichen Arealen. Nach meinem Dafürhalten ist das nicht hypothesenkonforme Ergebnis hauptsächlich durch eine ungünstig ausgewählte Bewegung charakterisiert, die die Gruppen im Scanner zu bewältigen hatten sowie durch Auslagerungen der Aktivierungen in andere Areale. Zudem ist die hier angewandte Messmethode zu ungenau für die Klärung einer solch präzisen Fragestellung nach Vergrößerung der Repräsentationen einzelner Finger. Ebenso einleuchtend klingen die Vermutungen, dass die Gehörlosen diese Bewegungen weitaus automatisierter und effizienter ausführen als die Kontrollgruppen und der Verdacht, dass das Fingertraining der Kontrollgruppen meinen erwarteten Vergrößerungen auf Seiten der Gebärdenden entgegensteuert. Zur genauen Klärung dieser Frage müssten erneute Studien durchgeführt werden. Gedanken dazu sollen in Kapitel 22 angestoßen werden.

22 Ausblick

Wie bereits in der zusammenfassenden Diskussion dargestellt, liegen die wesentlichen und nicht hypothesenkonformen Unterschiede in den Aktivierungsmustern zwischen den Gruppen im Broca-Areal, dem Gyrus praecentralis und dem dorsalen Pfad. Die Unterschiede im primären auditiven Kortex entsprechen dagegen der Hypothese. Diese doch auffälligen und stark polarisierten Unterschiede in den genannten drei Arealen zwischen den Gehörlosen und den drei hörenden Gruppen stimmen nicht oder nur eingeschränkt mit den Ergebnissen der gegenwärtigen Literatur überein und geben somit Platz für weiterführende Untersuchungen, die einige der aufgeworfenen Fragen beantworten könnten.

Bezüglich des *Broca-Areals* wurden für die Gehörlosen nicht die erwarteten Aktivierungen auf die bekannten Kategorien gefunden, die auf die klassische Verarbeitung der Gebärdensprache gedeutet hätte, wie es in der Literatur bisher so zu finden ist. Die Frage ist also: unter welchen Bedingungen und auf welche Kategorien reagieren die auditiv Deprivierten mit Aktivierungen in diesem klassischen Sprachareal, das an den Prozessen der Sprachproduktion maßgeblich beteiligt ist. Zunächst müsste meiner Meinung nach eine weitere Studie durchgeführt werden, die Aktivierungen im Broca-Areal durch geeignetes Stimulusmaterial forciert und klärt, unter welchen Bedingungen Gehörlose Aktivierungen in diesem Areal zeigen und unter welchen nicht. Vermutlich wäre es dazu sinnvoll, ein Paradigma mit folgenden Aufgaben durchzuführen: (a) passives Betrachten von Gebärdenbildern, (b) Aufforderung zum internalen Nachgebärden der dargebotenen Bilder und (c) aktives Nachgebärden der betrachteten Stimuli. Anhand einer solchen Studie ließe sich klären, ob die Aufgabenstellung in der vorliegenden Studie die Ursache für die fehlenden Aktivierungen im Broca-Areal war. Eine andere Vermutung für die zur Literatur konträren, fehlenden Aktivierungen war, dass die Anzahl der Stimuli eventuell zu gering oder die Stimuli zu leicht waren, um starke Aktivierungen zu finden. Deshalb könnte eine Untersuchung mit deutlich höherer Anzahl von dargebotenen Stimuli pro Kategorie durchgeführt sowie die Darbietung der Stimuli mit einer anstrengenden Zuordnungsaufgabe gekoppelt werden. Beispielsweise wäre die Aufgabenstellung denkbar, zu jeder dargebotenen Gebärde das entsprechende Gegenteil gebärdend zu produzieren (z. B. klein – groß). Denkbar wäre auch die Darbietung von Sätzen oder Satzgruppen in Gebärdensprache, um grammatikalische Strukturen anzubieten, die der Literatur zufolge ebenfalls Aktivierungen im Broca-Areal hervorrufen.

Ein weiteres, aus meiner Sicht ebenfalls ungewöhnliches Ergebnis waren die fehlenden Aktivierungen der Gehörlosen im *Gyrus praecentralis*. Da auch die erwarteten Aktivierungen im Broca-Areal bei dieser Gruppe ausblieben, liegt die Vermutung nah, dass Prozesse der internalen Bewegungsvorstellung und internele Sprechvorstellung in anderen Arealen stattfindet als in diesen beiden Arealen, die bei den Hörenden diese Funktionen erfüllen. Vermutlich werden die erwarteten Aktivierungen von Aktivierungen anderer Areale überlagert oder die Verarbeitung findet in anderen als in dieser Untersuchung erwarteten Arealen statt. Zur genauen Untersuchung dieser Fragestellung müsste eine whole-brain-Analyse durchgeführt werden, um alle Hirnstrukturen zu identifizieren, die bei den Gehörlosen gegenüber den Hörenden aktiviert sind.

Die Resultate der vorliegenden Untersuchung bezüglich des dorsalen Pfades gehen, was die Ergebnisse der Gehörlosen betrifft, nicht mit der Literatur konform und waren entgegen der aufgestellten Hypothese. Die erwarteten Aktivierungen in dieser Struktur aufgrund von Wahrnehmungs- und Bewegungsvorstellungsprozessen, die laut Literatur unter anderem durch Spiegelneurone im dorsalen Pfad zu Aktivierungen führt, blieben aus. Die hörenden Gruppen bestätigten hingegen meine Erwartungen. Allerdings erscheint mir die Erklärung sinnvoll, dass die Gehörlosen diese Struktur wegen der sehr schnellen und vordergründigen Wortdekodierung nicht in dem Maße benötigen wie die hörenden Gruppen. Dennoch wären vertiefende Untersuchungen denkbar, die eruieren, welche Art von Stimuli bei den Gehörlosen letztendlich Bewegungsvorstellung und internele Bewegungsnachahmung hervorrufen. Hier könnte eine randomisierte Abfolge von statischen Gebärdenbildern, Gebärdensprachvideos, statischen Bildern von Greifbewegungen und Videos vom Ergreifen einzelner Gegenstände dargeboten werden.

Das letzte, nicht hypothesenkonforme Ergebnis war die fehlende, statistisch signifikante Vergrößerung der Repräsentationsareale der Hände auf dem primären motorischen Kortex der Gehörlosen und Gebärdensprachdolmetscher gegenüber den Kontrollgruppen. Dieser Unterschied wurde aufgrund des deutlichen Mehrgebrauches der Hände aller Gebärdensprachnutzer erwartet und ist in der Literatur häufig mit Veränderungen der Repräsentationen im M1 oder S1 der betroffenen Körperteile belegt. Die hier vorgestellte Aufgabe des Fingertappings sollte mit erweiterten und komplexeren Bewegungen erneut durchgeführt werden. Vermutlich wäre es sinnvoller, Bewegungsabfolgen durchführen zu lassen, die in ihrer Bewältigung komplexer und schwieriger sind und die Arme in die

Bewegung involvieren. Im Vorfeld weiterer Untersuchungen müssten in jedem Falle genaue Daten bezüglich der an der Ausführung einer Gebärdenbewegung beteiligten Hauptkomponenten erhoben werden und die geforderten Bewegungen darauf abgestimmt werden.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Studie bestätigten zahlreiche Erwartungen bezüglich des primären auditiven Kortex, des Wernicke-Areals und des ventralen Pfades. Es kann ebenso zusammenfassend festgestellt werden, dass die Gebärdensprachdolmetscher bezüglich der zerebralen Verarbeitungsprozesse der dargebotenen Stimuli sehr starke Parallelen zu den hörenden Kontrollgruppen aufweisen und weniger zu den Gehörlosen, mit denen sie den Gebrauch der Gebärdensprache gemeinsam haben. Hier eröffnet sich ein breites Feld weiterführender Untersuchungen, anhand derer festgestellt werden kann, welche neuronalen Korrelate mit dem Gebrauch einer räumlichen Sprache zusammenhängen und welche zerebralen Veränderungen sich aufgrund der auditiven Deprivation ergeben.

Zur Literatur widersprüchliche Ergebnisse fanden sich dagegen in den Arealen, die mit Vorstellung oder Nachahmung von Bewegungen bzw. der Verarbeitung bewegungsrelevanter Informationen in Verbindung gebracht werden: dorsaler Pfad, Gyrus praecentralis und Broca-Areal. Die Ergebnisse des dorsalen Pfades überraschten zwar, sind aber meiner Meinung nach aufgrund der beschriebenen Erklärungsansätze einleuchtend. Sie zeigen, dass die Gehörlosen nicht in dem Umfang auf die Zerlegung bewegungsrelevanter Merkmale angewiesen sind, wenn sich diese Merkmale zu einer ihnen bekannten Bedeutung zusammenfügen. Vermutlich sind gerade der tägliche Umgang mit Bewegungen und dessen ständige Wahrnehmung die Ursache für die fehlenden Aktivierungen in den Arealen, die für die Verarbeitung solcher Stimuli verantwortlich sind. Da hauptsächlich die Verarbeitung von bewegungsrelevanten Stimuli (motorische Aspekte der visuell-räumlichen Gebärdensprache) interessiert hat, zeigt sich zum Abschluss dieser Arbeit, dass in dieser Hinsicht noch viele Fragen offen geblieben sind, die in weiterführenden Studien mit den bereits angesprochenen Vorschlägen zu veränderter Methodik und Stimulusmaterial geklärt werden könnten.

Literaturverzeichnis

- Allison, T., Puce, A., McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends in Cognitive Science*, 4, 267-278.
- Armstrong, B. A., Neville, H. J., Hillyard, S. A., Mitchell, T. V. (2002). Auditory deprivation affects processing of motion, but not color. *Cognitive Brain Research*, 14(3), 422-434.
- Armstrong, D. F., Stokoe, W. C., Wilcox, S. E. (1995). *Gesture and the nature of language*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Attwell, D., Iadecola, C. (2002). The neural basis of functional brain imaging signals. *TRENDS in Neurosciences*, 25(12), 621-625.
- Aziz-Zadeh, L., Maeda, F., Zaidel, E., Mazziotta, J., Iacoboni, M. (2002). Lateralization in motor facilitation during action observation: a TMS study. *Experimental Brain Research*, 144, 127-131.
- Bauder, H., Taub, E., Miltner, W. H. R. (2001). *Behandlung motorischer Störungen nach Schlaganfall: Die Taubsche Bewegungsinduktionstherapie*. Göttingen Bern Toronto Seattle: Hogrefe, Verlag für Psychologie.
- Bavelier, D., Brozinsky, C., Tomann, A., Mitchell, T., Neville, H., Liu, G. (2001). Impact of early deafness and early exposure to sign language on the cerebral organization for motion processing. *The Journal of Neuroscience*, 21(22), 8931-8942.
- Bavelier, D., Corina, D. P., Jezzard, P., Clark, V., Karni, A., Lalwani, A., Rauschecker, J. P., Braun, A., Turner, R., Neville, H. J. (1998b). Hemispheric specialization for English and ASL: left invariance – right variability. *Neuroreport*, 9(7), 1537-1542.

- Bavelier, D., Corina, D. P., Neville, H. J. (1998a). Brain and language: a perspective from Sign Language. *Neuron*, 21, 275-278.
- Bavelier, D., Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: where and how? *Neuroscience (Nature Reviews)*, 3, 443-452.
- Bavelier, D., Tomann, A., Hutton, C., Mitchell, T., Corina, D., Liu, G., Neville, H. (2000). Visual attention to the periphery is enhanced in congenitally deaf individuals. *The Journal of Neuroscience*, 20(93), 1-6.
- Beisteiner, R., Windischberger, C., Lanzenberger, R., Edward, V., Cunnington, R., Erdler, M., Gartus, A., Streibl, B., Moser, E., Deecke, L. (2001). Finger somatotopy in human motor cortex. *Neuroimage*, 13(6), 968-974.
- Bellugi, U., Klima, E. (1991). Eigenschaften räumlich-visueller Sprachen. In S. Prillwitz & T. Vollhaber (Eds.), *Gebärdensprache in Forschung und Praxis*, 135-166. Hamburg: Signum.
- Bellugi, U., Klima, E. S., Poizner, H. (1988). Sign language and the brain. *Research publications - Association for Research in Nervous and Mental Disease*, 66, 39-56.
- Birbaumer, N., Schmidt, R. F. (2003). *Biologische Psychologie* (5. Aufl.). Berlin Heidelberg New York Hongkong London Mailand Paris Tokio: Springer-Verlag.
- Bloch, F., Hansen, W. W., Packard, M. (1946). Nuclear induction. *Physical Review*, 69, 127.
- Boenninghaus, H. G. (1993). *Hals-Nasen-Ohrenheilkunde für Medizinstudenten: gegliedert nach dem Gegenstandskatalog 3* (9., überarb. u. ergä. Aufl. unter Mitwirkung v. T. Lenarz). Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest: Springer-Verlag.
- Bortz, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer-Verlag.

- Boschert, J., Hink, R. F., Deecke, L. (1983). Finger movement versus toe movement-related potentials: further evidence for supplementary motor area (SMA) participation prior to voluntary action. *Experimental Brain Research*, 52(1), 73-80.
- Bosworth, R. G., Dobkins, K. R. (1999). Left-hemisphere dominance for motion processing in deaf signers. *Psychological Science*, 10(3), 256.
- Bosworth, R. G., Dobkins, K. R. (2002). The effects of spatial attention on motion processing in deaf signers, hearing signers, and hearing nonsigners. *Brain and Cognition*, 49(1), 152-169.
- Bosworth, R. G., Dobkins, K. R. (2002a). Visual field asymmetries for motion processing in deaf and hearing signers. *Brain and Cognition*, 49(1), 170-181.
- Bosworth, R. G., Dobkins, K. R. (2002b). The effects of spatial attention on motion processing in deaf signers, hearing signers, and hearing nonsigners. *Brain and Cognition*, 49(1), 152-169.
- Boussaoud, D., Ungerleider, L. G., Desimone, R. (1990). Pathways for motion analysis: cortical connections of the medial superior temporal and fundus of the superior temporal visual areas in the macaque. *Journal of Comparative Neurology*, 296(3), 462-495.
- Boyes Bream, P. (1995). *Einführung in die Gebärdensprache und ihre Erforschung. Internationale Arbeiten zur Gebärdensprache und Kommunikation Gehörloser* (Bd. 11, 3. Aufl.). Hamburg: Signum-Verlag.
- Braun, C., Schweizer, R., Elbert, T., Birbaumer, N., Taub, E. (2000). Differential activation in somatosensory cortex for different discrimination tasks. *Journal of Neuroscience*, 20, 446-450.
- Brechmann, A., Scheich, H. (2005). Hemispheric shifts of sound representation in auditory cortex with conceptual listening. *Cerebral Cortex*, 15(5), 578-587.

- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R. J., Zilles, K., Rizzolatti, G., Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, 13(2), 400-404.
- Buccino, G., Binkofski, F., Riggio, L. (2004). The mirror neuron system and action recognition. *Brain and Language*, 89, 370-376.
- Burling, R. (1993). Primate calls, human language and nonverbal communication. *Current Anthropology*, 34(1), 25-53.
- Calvert, G. A., Bullmore, E. T., Brammer, M. J., Campbell, R., Williams, S. C. R., McGuire, P. K., Woodruff, P. W. R., Iversen, S. D., David, A. S. (1997). Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276, 593-596.
- Carey, J. R., Kimberley, T. J., Lewis, S. M., Auerbach, E. J., Dorsey, L., Rundquist, P., Ugurbil, K. (2002). Analysis of fMRI and finger tracking training in subjects with chronic stroke. *Brain*, 125, 773-788.
- Carlson, N., R. (2004). *Physiologische Psychologie* (8. Aufl.). München Boston San Francisco Harlow Ontario Sydney Mexico City Madrid Amsterdam: Pearson Education.
- Classen, J., Liepert, J., Wise, S. P., Hallett, M., Cohen, L. G. (1998). Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *Journal of Neurophysiology*, 79, 1117-1123.
- Cohen, L. G., Bandinelli, S., Findley, T. W., Hallett, M. (1991b). Motor reorganization after upper limb amputation in man. A study with focal magnetic stimulation. *Brain*, 114, 615-627.

- Cohen, L. G., Bandinelli, S., Topka, H. R., Fuhr, P., Roth, B. J., Hallett, M. (1991a). Topographic maps of human motor cortex in normal and pathological conditions: mirror movements, amputations and spinal cord injuries. *Electroencephalography and clinical neurophysiology. Supplement*, 43, 36-50.
- Colebatch, J. G., Deiber, M. P., Passingham, R. E., Friston, K., Frackowiak, S. J. (1991). Regional cerebral blood flow during voluntary arm and hand movements in human subjects. *Journal of Neurophysiology*, 65, 1392-1401.
- Damasio, A. R., Bellugi, U., Damasio, H., Poizner, H., v. Gilder, J. (1986). Sign language aphasia during left-hemisphere amygdala injection. *Nature*, 322, 363-365.
- Damasio, H., Grabowski, T. J., Tranel, D., Ponto, L. L. B., Hichwa, R. D., Damasio, A. R. (2001). Neural correlates of naming actions and of naming spatial relations. *Neuroimage*, 13, 1053-1064.
- Deane, P. D. (1991). Syntax and the brain: neurological evidence for the spatialization of form hypothesis. *Cognitive Linguistics*, 2(4), 361-367.
- Dechent, P., Frahm, J. (2003). Functional somatotopy of finger representations in human primary motor cortex. *Human Brain Mapping*, 18, 272-283.
- Desimone, R. (1996). Neural mechanisms for visual memory and their role in attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93, 13494-13499.
- D'Hondt, M., Leybaert, J. (2003). Lateralization effects during semantic and rhyme judgement tasks in deaf and hearing subjects. *Brain and Language*, 87(2), 227-240.
- Diller, G. (1990). Die zerebrale Repräsentation der Gebärden im Vergleich zur Lautsprache. *Sprache-Stimme-Gehör*, 14, 57-63.

- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176-180.
- Donner, T. H. (2003). *Kontrolle zielgerichteter visueller Suche im menschlichen Gehirn*. Berlin: Dissertation.
- Doron, N., Wollberg, Z. (1994). Cross-modal neuroplasticity in the blind mole rat *Spalax ehrenbergi*: a WGA-HRP tracing study. *Neuroreport*, 5(18), 2697-2701.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270, 305-307.
- Elbert, T., Rockstroh, B. (2004). Reorganization of human cerebral cortex: the range of changes following use and injury. *The Neuroscientist*, 10(2), 129-141.
- Elbert, T., Rockstroh, B., Bulach, D., Meinzer, M. (2003). Die Fortentwicklung der Neurorehabilitation auf verhaltensneurowissenschaftlicher Grundlag: Beispiel CI-Therapie. *Nervenarzt*, 74, 334-342.
- Emmorey K., Damasio, H., McCullough, S., Grabowski, T., Ponto, L. L. B., Hichwa, R. D., Bellugi, U. (2002). Neural systems underlying spatial language in American Sign Language. *Neuroimage*, 17, 812-824.
- Emmorey, K., Grabowski, T., McCullough, S., Ponto, L. L. B., Hichwa, R. D., Damasio, H. (2005). The neural correlates of spatial language in English and American Sign Language: a PET study with hearing bilinguals. *Neuroimage*, 24, 832-840.
- Falchier, A. (2001). Extensive projections from the primary auditory cortex and polysensory area STP to peripheral area V1 in the macaque. *Social Neuroscience Abstract*, 27, 511.21.

- Finney, E. M., Dobkins, K. R. (2001). Visual contrast sensitivity in deaf versus hearing populations: exploring the perceptual consequences of auditory deprivation and experience with a visual language. *Cognitive Brain Research*, 11(1), 171-183.
- Finney, E. M., Fine, I., Dobkins, K. R. (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nature Neuroscience*, 4(12) 1171-1173.
- Fishman, M. C., Michael, C. R. (1973). Integration of auditory information in the cat visual cortex. *Vision Research*, 13(8), 1415-1419.
- Flor, H. (2002). *Der Schmerz und sein Gedächtnis*. Ruperto Carola, 1, o. Seitenangabe.
- Friston, K. (2004). Experimental design and statistical parametric mapping. In: R. S. J. Frackowiak, J. Ashburner, R. J. Dolan, C. D. Frith, W. Penny, C. Price, S. Zeki (Eds.), *Human brain function* (2. Aufl.). London: Academic Press.
- Gelnar, P. A., Krauss, B. R., Szeverenyi, N. M., Apkarian, A. V. (1998). Fingertip representation in the human somatosensory cortex: an fMRI study. *Neuroimage*, 7(4), 261-283.
- Giraud, A. L., Price, C. J., Graham, J. M., Frackowiak, R.S.J. (2001). Functional plasticity of language-related brain areas after cochlear implantation. *Brain: A Journal of Neurology*, 124, 1307-1316.
- Goodale, M. A., Milner A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1), 20-25.
- Graziano, M. S. A., Taylor, C. S. R., Moore, T. (2002). Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex. *Neuron*, 34, 841-851.
- Greenfield, P. M. (1991). Language, tools and brain: the ontogeny and phylogeny of hierarchically organized sequential behaviour. *Behavioral and Brain Sciences*, 14, 531-595.

- Grosjean, F., Peng, L., Münte, T. F., Rodriguez-Fornells, A. (2003). Imaging bilinguals: when the neurosciences meet the language sciences. *Bilingualism: Language and Cognition*, 6(2), 159-165.
- Halber, M. (1995). *Computergestützte Auswertung der Positronen-Emissions-Tomografie des menschlichen Gehirns durch automatische Identifizierung von anatomischen Hirnstrukturen* (Dissertation). Köln.
- Henke, K. D., Huber, M. (1998). *Neonatales Hörscreening – Gesundheitspolitische Konsequenzen*. Berlin: Veröffentlichungsreihe des Berliner Zentrum Public Health. ISSN 0949-0752.
- Hermsdörfer, J., Goldenberg, G., Wachsmut, C., Conrad, B., Ceballos-Baumann, A. O., Bartenstein, P., Schwaiger, M., Boecker, H. (2001). Cortical correlates of gesture processing: clues to the cerebral mechanisms underlying Apraxia during the imitation of meaningless gestures. *Neuroimage*, 14, 149-161.
- Homan, R. W., Criswell, E., Wada, J. A., Ross, E. D. (1982). Hemispheric contributions to manual communication (signing and fingerspelling). *Neurology*, 32, 1020-1023.
- Horwitz, B., Amunts, K., Bhattacharyya, R., Patkin, D., Jeffries, K., Zilles, K., Braun, A. R. (2003). Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis. *Neuropsychologia*, 41(14), 1868-1876.
- Hutchinson, S., Kobayashi, M., Horkan, C. M., Pascual-Leone, A., Alexander, M. P., Schlaug, G. (2002). Age-related differences in movement representation. *Neuroimage*, 17(4), 1720-1728.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286(5449), 2526-2528.

- Indovina, I., Sanes, J. N. (2001). On somatotopic representation centers for finger movements in human primary motor cortex and supplementary motor area. *Neuroimage*, 13(6), 1027-1034.
- Jäncke, L., Schlaug, G., Steinmetz, H. (1997). Hand skill asymmetry in professional musicians. *Brain and Cognition*, 34, 424-432.
- Jäncke, L., Shah, N. J., Peters, M. (2000). Cortical activations on primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Cognitive Brain Research*, 10, 177-183.
- Johnson-Frey, S. H., Maloof, F. R., Newman-Norlund, R., Farrer, C., Inati, S., Grafton, S. T. (2003). Actions or Hand-Object Interactions? Human inferior frontal cortex and action observation. *Neuron*, 39, 1053-1058.
- Karnath, H. O., Thier, P. (2003). *Neuropsychologie*. Berlin Heidelberg New York Hongkong London Mailand Paris Tokio: Springer-Verlag.
- Kassubek, J., Hickok, G., Erhard, P. (2004). Involvement of classical anterior and posterior language areas in sign language production, as investigated by 4 T functional magnetic resonance imaging. *Neuroscience Letters*, 364, 168-172.
- Kiebel, S., Holmes, A. (2004). The general linear model. In: In: R. S. J. Frackowiak, J. Ashburner, R. J. Dolan, C. D. Frith, W. Penny, C. Price, S. Zeki (Eds.), *Human brain function* (2. Aufl.). London: Academic Press.
- Kim, D. E., Shin, M. J., Lee, K. M., Chu, K., Woo, S. H., Kim, Y. R., Song, E. C., Lee, J. W., Park, S. H., Roh, J. K. (2004). Musical training-induced functional reorganization of the adult brain: Functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study on amateur string players. *Human Brain Mapping*, 23(4), 188-199.
- Klann, J., Kastrau, F., Keminy, S., Huber, W. (2002). The neuropsychology of signed and written language: an fMRI-study. *Cortex*, 38, 874-877.

- Kolb, B., Wishaw, I. Q. (1996). *Neuropsychologie* (2. Aufl., aus dem Engl. übers. von Marianne Mauch). Heidelberg Berlin Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.
- Krist, H. (1995). *Kognitive Entwicklung, Handlungssteuerung und intuitive Physik: Eine integrative Forschungsperspektive*. Habilitationsschrift, Universität Frankfurt.
- Lauterbur, P. C. (1973). Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature*, 242, 190-191.
- Leybaert, J., D'Hondt, M. (2003). Neurolinguistic development in deaf children: the effect of early language experience. *International Journal of Audiology*, 42, 34-40.
- Liepert, J., Bauder, H., Miltner, W. H. R., Taub, E., Weiller, C. (2000). Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans. *Stroke*, 31, 1210-1216.
- Liepert, J., Miltner, W. H. R., Bauder, H., Sommer, M., Dettmers, C., Taub, E., Weiller, C. (1998). Motor cortex plasticity during constraint-induced movement therapy in stroke patients. *Neuroscience Letters*, 250, 5-8.
- Ligges, M. (2003). *fMRI-Untersuchung von Sprachverarbeitungsprozessen bei der Leserechtschreibstörung*. Unveröff. Dissertation, Universität Jena.
- Lillo-Martin, D., Klima, E. (1990). Pointing out differences: ASL pronouns in syntactic theory. In S. Fischer & P. Siple (Eds.), *Theoretical issues in sign language research: linguistics*. Chicago: University of Chicago Press.
- List, G. (1991). Rezension des Buches "Was die Hände über das Gehirn verraten" von Poizner, H., Klima, E. S., Bellugi, U., *Das Zeichen*, 16, 245-247.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T., Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, 412(12), 150-157.

- Loke, W. H., Song, S. (1991). Central and peripheral visual processing in hearing and nonhearing individuals. *Psychonomic Bulletin & Reviews*, 29, 437-440.
- Love, G., Webb, D. (1992). *Der 'Homunculus'*. o. Verlagsangabe.
- Macaluso, E., Frith, C. D., Driver, J. (2000). Modulation of human visual cortex by crossmodal spatial attention. *Science*, 289(5482), 1206-1208.
- MacSweeney, M., Calvert, G. A., Campbell, R., McGuire, P. K., David, A. S., Williams, S. C. R., Woll, B., Brammer, M. J. (2002b). Speechreading circuits in people born deaf. *Neuropsychologia*, 40, 801-807.
- MacSweeney, M., Woll, B., Brammer, M., Campbell, R., Calvert, G., David, A., Williams, S. C. R., McGuire, P. K. (2001). Cortical correlates of lexical and syntactic sign language processing. *Neuroimage*, 13, 563.
- MacSweeney, M., Woll, B., Campbell, R., Calvert, G. A., McGuire, P. K., David, A. S., Simmons, A., Brammer, M. J. (2002). Neural correlates of British Sign Language comprehension: spatial processing demands of topographic language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(7), 1064-1075.
- MacSweeney, M., Woll, B., Campbell, R., McGuire, P. K., David, A. S., Williams, S. C. R., Suckling, J., Calvert, G. A., Brammer, M. J. (2002a). Neural systems underlying British Sign Language and audio-visual English processing in native users. *Brain*, 125, 1583-1593.
- Maisch, G., Wisch, F. H. (2002a). *Gebärdenlexikon. Grundgebärden Band 1*. (8. Aufl., Deutsche Gesellschaft zur Förderung der Gehörlosen und Schwerhörigen e.V.). Hamburg: Verlag hörgeschädigter Kinder.
- Maisch, G., Wisch, F. H. (2000). *Gebärdenlexikon. Mensch Band 2*. (überarb. Neuaufl., Deutsche Gesellschaft zur Förderung der Gehörlosen und Schwerhörigen e.V.). Hamburg: Verlag hörgeschädigter Kinder.

- Maisch, G., Wisch, F. H. (2002b). *Gebärdenlexikon. Natur Band 3*. (Deutsche Gesellschaft zur Förderung der Gehörlosen und Schwerhörigen e.V.). Hamburg: Verlag hörgeschädigter Kinder.
- Maldjian, J. A., Gottschalk, A., Patel, R. S., Detre, J. A., Alsop, D. C. (1999). The sensory somatotopic map of the human hand demonstrated at 4 Tesla. *Neuroimage*, 10(1), 55-62.
- McCullough, S., Emmorey, K., Sereno, M. (2005). Neural organization for recognition of grammatical and emotional facial expressions in deaf ASL signers and hearing nonsigners. *Cognitive Brain Research*, 22(2), 193-203.
- McGuire, P. K., Robertson, D., Thacker, A., David, A. S., Kitson, N., Frackowiak, R. S., Frith, C. D. (1997). Neural correlates of thinking in sign language. *Neuroreport*, 8(3), 695-698.
- McNeill, D. (1992). *Hand and mind: what gestures reveal about thought*. University of Chicago Press.
- 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.
- Milner, A. D., Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress Brain Research*, 95, 317-337.
- Miltner, W. H. R., Weiss, T. (1999). Flexible Nervennetze. Zur Bedeutung kortikaler Plastizität und Reorganisation für Somatosensibilität, Motorik und Lernen. *Neurowissenschaft, Forschungsmagazin*, 12-17.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G. (1982). Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-occipital cortex in monkeys. *Behavioural Brain Research*, 6(1), 57-77.

- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6, 414-417.
- Mitchell, T. V. (2002a). *Impact of deafness on the development of face processing*. Projekt des Eunice Kennedy Shriver Center, o. Seitenangabe.
- Mitchell, T. V. (2002b). *Development and plasticity of dorsal and ventral stream processing*. Projekt des Eunice Kennedy Shriver Center, o. Seitenangabe.
- Molcho, S., Klinger, T., Luszkat, H. A. (1983). *Körpersprache*. München: Mosaik Verlag.
- Morrell, F. (1972). Visual system's view of acoustic space. *Nature*, 238, 44-46.
- Nachtigall, C., Wirtz, M. (2002). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik. Statistische Methoden für Psychologen* (2. Aufl.). Weinheim München: Juventa Verlag.
- Nakamura, A., Maess, B., Knösche, T. R., Gunter, T. C., Bach, P., Friederici, A. D. (2004). Cooperation of different neuronal systems during hand sign recognition. *Neuroimage*, 23, 25-34.
- Neville, H. J., Bavelier, D., Corina, D., Rauschecker, J., Karni, A., Lalwani, A., Braun, A., Clark, V., Jezzard, P., Turner, R. (1998). Cerebral organization for language in deaf and hearing subjects: biological constraints and effects of experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 922-929.
- Neville, H. J., Coffey, S. A., Lawson, D. S., Fischer, A., Emmorey, K., Bellugi, U. (1997). Neural systems mediating American Sign Language: effects of sensory experience and age of acquisition. *Brain and Language*, 57(3), 285-308.
- Neville, H., Darves, C., S. (2004). *Two sides of neural plasticity in the dorsal visual pathway: evidence from deaf, dyslexic, and control adults*. Projekt des Brain Development Lab, Department of Psychology at the University of Oregon, o. Seitenangabe.

- Newman, A. J., Bavelier, D., Corina, D., Jezzard, P., Neville, H. J. (2002). A critical period for right hemisphere recruitment in American Sign Language processing. *Nature Neuroscience*, 5(1), 76-80.
- Newport, E. (1988). Constraints on learning and their role in language acquisition: studies of the acquisition of American Sign Language. *Language Sciences*, 10(1), 147-172.
- Newport, E., Meier, R. (1986). Acquisition of American Sign Language. In D. Slobin (Ed.). *The cross-linguistic study of language acquisition*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Nishimura, H., Hashikawa, K., Doi, K., Iwaki, T., Watanabe, Y., Kusuoka, H., Nishimura, T., Kubo, T. (1999). Sign language „heard“ in the auditory cortex. *Nature*, 397(6715), 116.
- Nöth, J. (1992). *Gebärdenspracherwerb und funktionelle Asymmetrien der Hirnhemisphären. Ergebnisse aus der experimentellen und klinischen Neuropsychologie – eine kritische Bestandsaufnahme* (Kölner Arbeiten zur Sprachpsychologie; Bd. 4). Frankfurt am Main Berlin Bern New York Paris Wien: Verlag Peter Lang GmbH.
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R., Tank, D. W. (1990a). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24), 9868-9872.
- Ogawa, S., Lee, T. M., Nayak, A. S., Glynn, P. (1990b). Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance in Medicine*, 14, 68-78.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Oerter, R., Montada, L. (Hrsg.) (2002). *Entwicklungspsychologie* (5. Aufl.). Weinheim: Psychologie Verlags Union.

- Ortigue, S., Thut, G., Landis, T., Michel, C. M. (2005). Time-resolved sex differences in language lateralization. *Brain*, 128(5), E28.
- Pantev, C., Engelien, A., Candia, V., Elbert, T. (2001). Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 300-314.
- Pascual-Leone, A., Torres, F. (1993). Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain*, 1160, 39-52.
- Penfield, W., Rasmussen, T. (1950). *The cerebral cortex of man: a clinical study of localization of function*. New York: MacMillan.
- Penny, W., Holmes, A. (2004). *Random effects analysis*. In: R. S. J. Frackowiak, J. Ashburner, R. J. Dolan, C. D. Frith, W. Penny, C. Price, S. Zeki (Eds.), *Human brain function* (2. Aufl.). London: Academic Press.
- Pinel, J. P. J. (2001). *Biopsychologie* (Hrsg. von Wolfram Boucsein, 2. neubearb. Aufl., aus dem Amerikan. übers. von Eva Hert). Heidelberg Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Podzebenko, K., Egan, G. F., Watson, J. D. (2002). Widespread dorsal stream activation during a parametric mental rotation task, revealed with functional magnetic resonance imaging. *Neuroimage*, 15(3), 547-558.
- Poizner, H., Klima, E. S., Bellugi, U. (1990). *Was die Hände über das Gehirn verraten*. Neuropsychologische Aspekte der Gebärdensprachforschung (aus dem Amerikanischen von Stefan Röhrich und Manfred Jansen). Hamburg: Signum-Verlag.
- Pritzel, M., Brand, M., Markowitsch, H. J. (2003). *Gehirn und Verhalten. Ein Grundkurs der physiologischen Psychologie*. Heidelberg Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.

- Probst, R., Grevers, G., Iro, H. (2004). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde* (2. korrigierte und aktualisierte Aufl.). Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag.
- Purcell, E. M., Torrey, H. C., Pound, R. V. (1946). Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. *Physical Review*, 69, 37-38.
- Rammel, G. (1981). *Untersuchungen zur Zeichensystematik der Gebärden und Gebärdensprachen*. Heidelberg: Julius Groß Verlag.
- Rao, S., Bandettini, P., Binder, J., Bobholz, J., Hammeke, T., Hyde, J. (1996). Relationship between finger movement rate and functional magnetic signal change in human primary motor cortex. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 16, 1250-1254.
- Rauschecker, J., Tian, B., Korte, M., Egert, U. (1992). Crossmodal changes in the somatosensory vibrissa/barrel system of visually deprived animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Neurobiology*, 89 pp., 5063-5067.
- Recanzone, G. H., Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Grajski, K. A., Dinse, H. R. (1992). Topographic reorganization of the hand representation in cortical area 3b owl monkeys trained in a frequency-discrimination task. *Journal of Neurophysiology*, 67(5), 1031-1056.
- Recanzone, G. H., Schreiner, C. E., Merzenich, M. M. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *Journal of Neuroscience*, 13, 87-103.
- Reiser, M., Semmler, W. (1997). *Magnetresonanztomografie* (2. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag.
- Rettenbach, R., Diller, G., Sireteanu, R. (1999). Do deaf people see better? Texture segmentation and visual search compensate in adult but not in juvenile subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 5, 560-583.

- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. (1999). Resonance behaviors and mirror neurons. *Archives of Italian Biology*, 137(2-3), 85-100.
- Rockstroh, B., Vanni, S., Elbert, T., Hari, R. (1998). Extensive somatosensory stimulation alters somatosensory evoked fields. In C. Aine, Y. Okada, G. Stroink, S. Swithenby, C. Wood (Eds.). *Advances in biomagnetism research: Biomag96*. New York: Springer-Verlag.
- Röder, B., Stock, O., Rösler, F., Bien, S., Neville, H. J. (2001). Plasticity of language functions in blind humans: an fMRI study. *Cognitive Neuroscience Social Abstract*.
- Ronnberg, J., Soderfeldt, B., Risberg, J. (2000). The cognitive neuroscience of sign language. *Acta Sychologica*, 105, 237-254.
- Roy, C. S., Sherrington, C. S. (1890). On the regulation of the blood-supply of the brain. *Journal of Physiology*, 11, 85-108.
- Ruoff, A., Fuchs, H., Gersbach, B., Graf, R., Thiers, S. (1990). *Häufigkeitwörterbuch gesprochener Sprache. Gesondert nach Wortarten, alphabetisch, rückläufig-alphabetisch und nach Häufigkeit geordnet* (2., unveränd. Aufl.). Tübingen: Max Niemeyer Verlag GmbH & Co. KG.
- Sadato, N., Campbell, G., Ibanez, V., Deiber, M., Hallett, M. (1996). Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements. *Journal of Neuroscience*, 16, 2691-2700.
- Schild, H. H. (1990). *MRI made easy*. Bonn: Schering Diagnostika.
- Schneider, G. E. (1969). Two visual systems. *Science*, 163(870), 895-902.
- Sforza, C., Macri, C., Turci, M., Grassi, G., Ferrario, V. F. (2003). Neuromuscular patterns of finger movements during piano playing. Definition of an experimental protocol. *Italien Journal of Anatomy and Embryology*, 108(4), 211-222.

- Shibata, D., Zhong, J. (2001). Internal sentence generation in the deaf: English and sign language. *Neuroimage*, 13, 601.
- Soderfeldt, B., Ingvar, M., Ronnberg, J., Eriksson, L., Serrander, M., Stone-Elander, S. (1997). Signed and spoken language perception studied by positron emission tomography. *Neurology*, 49(1), 82-87.
- Stehling, M. K., Turner, R., Mansfield, P. (1991). Echo-planar imaging: magnetic resonance imaging in a fraction of a second. *Science*, 254(5028), 43-50.
- Sterr, A., Elbert, T., Berthold, I., Kolbel, S., Rockstroh, B., Taub, E. (2002). Longer versus shorter daily constraint-induced movement therapy of chronic hemiparesis: an exploratory study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83, 1374-1377.
- Sterr, A., Müller, M. M., Elbert, T., Rockstroh, B., Pantev, C., Taub, E. (1998a). Changed perceptions in Braille readers. *Nature*, 391, 134-135.
- Sterr, A., Müller, M. M., Elbert, T., Rockstroh, B., Pantev, C., Taub, E. (1998b). Perceptual correlates of changes in cortical representation of fingers in blind multifinger Braille readers. *Journal of Neuroscience*, 18(11), 4417-4423.
- Supalla, T., Newport, E. (1980). Clue from the acquisition of signed and spoken language. In U. Bellugi, M. Studdert-Kennedy (Eds.). *Signed and spoken language: biological constraints on linguistic form*. Weinheim: Verlag Chemie.
- Talairach, J., Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme Medical.
- Taub, E., Uswatte, G. (2003). Constraint-induced movement therapy: bridging from the primate laboratory to the stroke rehabilitation laboratory. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 41, 34-40.

- Theoret, H., Merabet, L., Pascual-Leone, A. (2004). Behavioral and neuroplastic changes in the blind: evidence for functionally relevant cross-modal interactions. *Journal of Physiology-Paris*, 98(1-3), 221-233.
- Thurn, P., Bücheler, E., Lackner, K. J., Thelen, M. (1998). *Einführung in die radiologische Diagnostik* (10. völlig Neubearb. Aufl.). Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag.
- Trepel, M. (1999). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion* (2., komplett überarb. Aufl.). München Stuttgart Jena Lübeck Ulm: Urban & Fischer.
- Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologie-Forschung*, 31(4), 299-348.
- Ungerleider, L. G. (1995). Functional brain imaging studies of cortical mechanisms for memory. *Science*, 270(5237), 769-775.
- van der Kallen, B. F., Rijpkema, G., van Erning, L. J., Merx, J. L., Horstink, M. W., Thijssen, H. O. (1996). Functional MRI: imaging of motor cortex function. *Nederlands tijdschrift voor geneeskunde*, 140(5), 248-254.
- Volgyi, B., Farkas, T., Toldi, J. (1993). Compensation of a sensory deficit inflicted upon newborn and adult animals. A behavioural study. *Neuroreport*, 4, 827-829.
- Volterra, V., Erting, C. (1990). *From gesture to language in hearing and deaf children*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Weishaupt, D., Köchli, V. D., Marinček, B. (2001). *Wie funktioniert MRI? Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung* (3. überarb. Aufl.). Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Weiss, T., Miltner, W. H. R., Huonker, R., Friedel, R., Schmidt, I., Taub, E. (2000). Rapid functional plasticity of the somatosensory cortex after finger amputation. *Experimental Brain Research*, 134, 199-203.

- Weiss, T., Miltner, W. H. R., Liepert, J., Meissner, W., Taub, E. (2004). Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block. *European Journal of Neuroscience*, 20, 3413-3423.
- Wessel, K., Zeffiro, T., Toro, C., Hallett, M. (1997). Self-paced versus metronome-paced finger movements. A positron emission tomography study. *Journal of Neuroimaging*, 7(3), 145-151.
- Yousry, T. A., Schmid, U. D., Alkadhi, H., Schmidt, D., Peraud, A., Buettner, A., Winkler, P. (1997). Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. *Brain*, 120, 141-157.
- Zenner, H. P. (1997). *Hals-Nasen-Ohrenheilkunde*. London Glasgow Weinheim New York Tokyo Melbourne Madras: Chapman and Hall.

Internetreferenzen:

- I Culham, J. (2004)
http://defiant.ssc.uwo.ca/Jody_web/fmri4dummies.htm
Stand : April 2004
- II Crelier, G., Järman, T. (2004)
<http://old.weboffice.ethz.ch/jl/ethlife/fMRI.html>
Stand: Mai 2004
- III Spektrum Akademischer Verlag (2004)
<http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/neuro/1110>
Stand: Juni 2004
- IV Medicine worldwide
<http://www.m-ww.de/krankheiten/hno/taubheit.html>
Stand: Juni 2004

Abkürzungsverzeichnis

A1	Primärer auditiver Kortex
A2	Sekundärer auditiver Kortex
AC	Anteriore Kommissur
ADP	Adenosindiphosphat
ALM	Allgemeines lineares Modell
ANOVA	Analysis of variance
ASL	American Sign Language
ATP	Adenosintriphosphat
BA	Brodmann-Areal
BOLD	Blood oxygen level dependent
CGL	Corpus geniculatum laterale
CI	Cochlea-Implantat
CIMT	Constraint induced movement therapy
CT	Computertomografie
D	Gebärdensprachdolmetscher
D	auch: Daumen
D1	Daumen
D2	Zeigefinger
D3	Mittelfinger
D4	Ringfinger
D5	Kleiner Finger
DGS	Deutsche Gebärdensprache
EA	Euklidischer Abstand
EEG	Elektroenzephalografie
EPI	Echo planar imaging
ERTS	Experimental run time system
FA	Flip-Winkel
FIT	Funktioneller Intensitätswert
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomografie
FoV	Field of view
GES	Kategorie: Gesten

GL	Gehörlose
H	Hand
H₀	Nullhypothese
H₁	Alternativhypothese
HA	Hirnareal
IPC	Inferiorer parietaler Kortex
K1	Kontrollgruppe 1
K2	Kontrollgruppe 2
KF	Kleiner Finger
KG	Klassifikationsgebärden
LBG	Lautsprachbegleitende Gebärden
LFP	Lokale Feldpotentiale
LI	Lateralitätsindex
M1	Primärer motorischer Kortex
MEG	Magnetenzephalografie
MRT	Magnetresonanztomografie
NrofVo	Number of voxels
OBJ	Kategorie: Objekte
PC	Posteriore Kommissur
PET	Positronenemissionstomografie
PFE	Kategorie: Pfeile
PPC	Posteriorer parietaler Kortex
RF	Radiofrequenz
ROI	Region of interest
SE	Standardfehler
SIN	Kategorie: Gebärden ohne Pfeil (= sinnlose Gebärden)
SMA	Supplementär motorisches Areal
SPC	Superiorer parietaler Kortex
STA	Kategorie: Gebärden statisch
STS	Sulcus temporalis superior
T1	Longitudinale Relaxationszeit
T2	Transversale Relaxationszeit
T2*	Transversale Relaxationszeit mit sehr kurzer TE
TAL	Talairach-Koordinaten

TE	Echozeit
TMS	Transkranielle Magnetstimulation
TR	Repetitionszeit
V1	Primärer visueller Kortex
V2	Sekundärer visueller Kortex
voxel	Volume element
vtc	Voxel time course
WÖR	Kategorie: Wörter

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Schematischer Überblick über den Verlauf der Hörbahn. Eingezeichnet sind die Bahnen eines Ohres (Quelle: Birbaumer & Schmidt, S. 242, 2003).....	5
Abbildung 2.2:Gliederung und Nummerierung der Rindenfelder nach Brodmann; laterale Ansicht der linken Großhirnhemisphäre (Quelle: Trepel, S. 178, 1999).....	7
Abbildung 3.1:Grafische Darstellung der klassischen Sprachareale, die in ihrer Funktion unabhängig von der Sprachmodalität agieren (Quelle: modifiziert nach Karnath & Thier, 2003; S. 375)	17
Abbildung 3.2:Lage des primären auditiven Kortex (BA 41); Maßgeblich beteiligt an: Bewusstmachung von akustischen Impulsen aus dem Innenohr (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.3:Lage des sekundären auditiven Kortex (BA 22, 42); Maßgeblich beteiligt an: Interpretativer und integrativer Verarbeitung von akustischen Impulsen (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.4: Lage des Broca-Areals (BA 44, 45); Maßgeblich beteiligt an: Formung von Satzbau und Wortlaut, sowie Initiierung der Muskeln, die zum Sprechen benötigt werden (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.5: Lage des primärmotorischen Kortex (BA 4); Maßgeblich beteiligt an: Planung und Realisierung von Willkürbewegungen (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.6: Lage der Areale des ventralen Pfades (BA 20, 36, 37); Maßgeblich beteiligt an: Objekterkennung („WAS“-Pfad) (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.7:Lage der Areale des dorsalen Pfades (BA 7a, 7b); Maßgeblich beteiligt an: Lokalisation von Objekten im Raum („WO“-Pfad) (Quelle: modifiziert nach Trepel, 1999)	21
Abbildung 3.8: (a) KG + Verb: etwas Breites / Flaches + nebeneinander stellen; (b) KG + Verb: etwas Kleines / Eckiges + hineinstellen; (c) klassifizierende Handform für die Klasse der kleinen, eckigen Objekte; (d) klassifizierende Handform für die Klasse der kleinen, eckigen Gegenstände mit breiter Oberfläche (Quelle: Boyes Bream, S. 82, 83, 1995) 28	
Abbildung 5.1: Bild 1 Darstellung eines T1-gewichteten Bildes (TR 450ms / TE 14ms); Bild 2 Darstellung eines T2-gewichteten Bildes (TR 5000ms / TE 99ms) (Abbildungen aus durchgeführten Messungen entnommen)	43
Abbildung 5.2: Bild 1 anatomisches MRT-Bild (high resolution; 1mm Schichtdicke); Bild 2 funktionelles MRT-Bild (low resolution; 3mm Schichtdicke) (Quelle: Internetadresse I, Culham, 2004).....	44
Abbildung 5.3: Verlauf der Brain Impulse Response (Quelle: Internetadresse I, Culham, 2004).....	48
Abbildung 5.4: Darbietungsreihenfolge der Stimuli für den Bilderblock. (F) Fixationsbedingung; (1) bis (6) Kategorien (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 5.5:Darbietungsreihenfolge der Stimuli für beide Fingertappingblöcke. (F) Fixationsbedingung; (D) Daumen; (K) Kleiner Finger; (H) Hand (eigene Darstellung)	56
Abbildung 5.6: Paradigmaverlauf (eigene Darstellung)	57
Abbildung 5.7: Schematisierter experimenteller Aufbau des MRT-Systems (Quelle: modifizierte Abbildung aus Thurn, Bücheler, Lackner & Thelen, S. 26, 1998)	58

- Abbildung 5.8: Bild 1: Beispiel eines Artefaktes; verursacht durch Metall in der Nähe der Kopfspule (Quelle: Abbildung aus durchgeführten Messungen entnommen) Bild 2: 40 Schichten (transversal); an der AC-PC Linie ausgerichtet (Quelle: Abbildung aus durchgeführten Messungen entnommen)..... 60**
- Abbildung 5.9: Eingabe notwendiger Parameter zum Erstellen einer funktionellen Datei (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 64**
- Abbildung 5.10: Eine Datei der funktionellen Rohdaten über alle Schichten (hier: 40 Schichten). Das Bilderparadigma bestand aus 268 funktionellen Scans. Das Motorikparadigma wurde mit 136 Scans je bewegter Seite durchgeführt. (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 64**
- Abbildung 5.11: Parameterfestlegung für die Bewegungskorrektur (*motion correction*) (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 65**
- Abbildung 5.12: Berechnung der Abweichungen von der Nulllinie in sechs Richtungen (dargestellt mit sechs verschiedenen Farben) (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 66**
- Abbildung 5.13: Parameterfestlegung zur Erstellung eines anatomischen Bildes (Anzahl der Schichten in einer T1-gewichteten Aufnahme: 192) (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 67**
- Abbildung 5.14: Erstelltes dreidimensionales, anatomisches Bild (T1-gewichtet) (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 67**
- Abbildung 5.15: Laden des anatomische Positionsfiles (*ana.pos*) und des funktionellen Positionsfiles (*func.pos*) (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 68**
- Abbildung 5.16: A Beispiel für ein ungenaues Übereinanderlegen eines anatomischen (dunkelgrau, scharf) und funktionellen Bildes (hellgrau, verschwommen) B Beispiel für ein genaues Übereinanderlegen eines anatomischen und funktionellen Bildes (Quelle: Brain Voyager 2000) 69**
- Abbildung 5.17: a Übersicht der drei Ebenen im standardisierten Talairach-Raum (Quelle: Birbaumer & Schmidt, 2003; Kap. 9) b Bezeichnung der Raumrichtungen (eigene Darstellung) 70**
- Abbildung 5.18: Bestimmung der anterioren Kommissur (= AC) und posterioren Kommissur (= PC) (Quelle: Brain Voyager 2000) 70**
- Abbildung 5.19: Bestimmung der acht Referenzpunkte zur Standardisierung des Gehirnes und exakten Ausmaßbestimmung des noch nicht bearbeiteten Gehirnes (Quelle: Brain Voyager 2000) 71**
- Abbildung 5.20: Verknüpfung von funktionellen und anatomischen Daten (Quelle: Brain Voyager 2000) 72**
- Abbildung 5.21: Postulierter, zeitlicher Verlauf der BOLD-Kurve anhand eines event-Protokolls. (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 73**
- Abbildung 5.22: Räumliche Glättung der Daten. Festgelegte Filtermaske für das Bilderparadigma: 8 mm. Festgelegte Filtermaske für das Motorik-Paradigma: 6 mm. (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 75**
- Abbildung 5.23: Darstellung des erstellten Modells, auf dessen Basis geprüft wird, wie gut das postulierte Modell mit den sechs Kategorien die vorliegenden Daten beschreibt. (Quelle: Brain Voyager 2000) 76**
- Abbildung 5.24: Durch die sechs Prädiktoren ausgelöste Aktivierungen in einem Gehirn eines Probanden. (Quelle: Brain Voyager 2000)..... 78**

- Abbildung 6.1:** Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *Wernicke*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen..... 99
- Abbildung 6.2:** Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *Broca*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen. 110
- Abbildung 6.3:** Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im Hirnareal *ventraler Pfad*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen..... 119
- Abbildung 6.4:** Lateralitätsindex für alle vier Gruppen bezüglich der Aktivierungen in der linken und rechten Hemisphäre im *Gyrus praecentralis*. Die Berechnungen beruhen auf gemittelten Voxelanzahlen über alle Versuchspersonen je Bedingung. Werte oberhalb der Nulllinie weisen auf rechtslateralisierte Aktivierungsmuster hin. Werte unterhalb der Nulllinie zeigen linkslateralisierte zerebrale Aktivierungen..... 127
- Abbildung 7.1:** Schematisch-vereinfachte Darstellung des Aktivierungsniveaus zweier Bedingungen (hier wird jede Bedingung symbolisch mit einem Voxel dargestellt) gegenüber der Baseline und deren Auswirkungen auf die Signifikanz des resultierenden Ergebnisses. (Eigene Darstellung) 136
- Abbildung 8.1:** Bild 1 Lateraler Sagittalschnitt: Gyri temporales transversi (primärer auditiver Kortex); Bild 2 Sagittalschnitt: Gyrus temporalis superior (sekundärer auditiver Kortex) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 206, 1999) 161
- Abbildung 10.1:** Aktivierungsmuster für den Vergleich Gehörlose > Kontrollgruppe 1 in den Gyri temporales transversi (= A1) für die Bedingung *sinnlos*. 174
- Abbildung 10.2:** Aktivierungsmuster für den Vergleich Gehörlose>Kontrollgruppe1 im Gyrus temporalis superior (=A2) für die Bedingung *statisch*. 174
- Abbildung 12.1:** Kortikales visuelles System des Makaken; die Nomenklatur der Areale ist uneinheitlich (geordnet nach Position im Sehsystem, zytoarchitektonischer Bezeichnung oder anatomischer Lokalisation) (Quelle: Ungerleider, 1995)..... 183
- Abbildung 12.2:** Stark vereinfachte Darstellung der retinogenikulosträren Bahn sowie ein Ausschnitt ihrer kortikalen Projektionsgebiete im menschlichen Gehirn. (Quelle: Karnath & Thier, S. 75, 2003) 185
- Abbildung 12.3:** Vereinfachte Darstellung des dorsalen und ventralen Pfades anhand der lateralen Ansicht des Gehirnes. (Quelle: modifizierte Abbildung aus Pinel, 2001, S. 206) 185
- Abbildung 12.4:** Bild 1 Laterale Ansicht des Gehirnes: Area PG (= 7a) und Area PF (= 7b) (Dorsaler Pfad); Bild 2 Laterale Ansicht des Gehirnes: BA 18, 19, 20, 36, 37 (Gyrus fusiformis) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 206, 1999)..... 186
- Abbildung 12.5:**Mediale Darstellung des Gehirnes: BA 20, 36, 37 (Ventraler Pfad) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Kolb & Whishaw, S.48, 1996)..... 187

Abbildung 12.6:Parallelverarbeitung von visuellen Reizen im dorsalen und ventralen Pfad sowie Darstellung der anatomischen Lokalisationen der Areale zur Bewegungswahrnehmung; laterale Ansicht des Gehirnes (Quelle: modifizierte Abbildung aus Karnath & Thier, 2003, S. 39 und S. 157).....	189
Abbildung 14.1:Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“ gegen Baseline Fixationskreuz.....	197
Abbildung 14.2:Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“ gegen Baseline Fixationskreuz.....	198
Abbildung 14.3:Gruppenvergleich der Aktivierungen im superioren parietalen Kortex (SPC = 7a, 7b) auf die Bilderkategorie „Gebärden mit Pfeil“	199
Abbildung 15.1:Darstellung aller bewegungsrelevanten Informationen in einem Bild der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“. Beispielbild für die Gebärde „Schmerz(en)“ (eigene Darstellung).	206
Abbildung 15.2:Darstellung aller relevanten Informationen in einem Bild der Kategorie „Gebärden mit Pfeil“, die im ventralen Pfad verarbeitet werden. Beispielbild für die Gebärde „Schmerz(en)“ (eigene Darstellung).....	211
Abbildung 16.1:linke Ansicht: Somatotopie des motorischen Kortex in der rechten zerebralen Hemisphäre; rechte Ansicht: Somatotopie des somatosensorischen Kortex in der rechten zerebralen Hemisphäre (Quelle: in Anlehnung an Penfield & Rasmussen, 1950; Abbildung aus: Love & Webb, S. 19, 1992).....	215
Abbildung 16.2:Sagittalschnitt: Gyrus praecentralis (primärmotorischer Kortex oder BA 4) (Quelle: modifizierte Abbildung aus Trepel, S. 196, 1999)	224
Abbildung 18.1:Schema zur Programmierung motorischer Sequenzen bei einer komplexen, sequenziellen Fingerbewegung gegenüber einer von den Probanden dieser Untersuchung ausgeführten einfachen, repetitiven Fingerbewegung. F ₂ =Zeigefinger, F ₃ =Mittelfinger, F ₄ =Ringfinger, F ₅ =Kleiner Finger (Quelle: Forster, S. 8, 2002).....	230
Abbildung 18.2:Performance des Finger- und Handtapping; v.l.n.r.: Ausgangsstellung, Endposition vom Tapping des Daumens, des Kleinen Fingers, der Hand (eigene Darstellung) ...	231
Abbildung 18.3:Die Nomenklatur der Finger und Formel zur Berechnung des euklidischen Abstandes zwischen zwei Punkten im dreidimensionalen Raum. Der Abstand d zwischen den zwei Punkten x mit den Koordinaten x_1, x_2, x_3 und y mit den Koordinaten y_1, y_2, y_3 . (eigene Darstellung)	233
Abbildung 19.1:Anzahl der aktiven Voxel auf der kontralateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen <i>Gehörlose (=GL)</i> und <i>Kontrollgruppe 1 (=KI)</i> . Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)	237
Abbildung 19.2:Anzahl der aktiven Voxel auf der kontralateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen <i>Gebärdensprachdolmetscher (=D)</i> und <i>Kontrollgruppe 2 (=K2)</i> . Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)	238
Abbildung 19.3:Anzahl der aktiven Voxel auf der ipsilateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen <i>Gehörlose (=GL)</i> und <i>Kontrollgruppe 1 (=KI)</i> . Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung)	238

- Abbildung 19.4:**Anzahl der aktiven Voxel auf der ipsilateralen Hemisphäre beim Tapping von dem jeweils rechten und linken Daumen, Kleinem Finger und der Hand für die Gruppen *Gebärdensprachdolmetscher (=D)* und *Kontrollgruppe 2 (=K2)*. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. (eigene Darstellung) 239
- Abbildung 19.5:**(a) bis (c) Darstellung der Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“. Gezeigt ist der jeweilige Haupteffekt „Lateralität“ für die Ausprägung des Faktors „bewegter Finger“. Vergleich der aktiven Voxel beim Tapping mit der rechten Hand zwischen der kontralateralen und ipsilateralen Seite gemittelt über alle Gruppen für die Ausprägungen Daumen (a) Kleiner Finger (b) und Hand (c). Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung)..... 241
- Abbildung 19.6:**(d) bis (e) Darstellung der Interaktion „Lateralität*bewegter Finger“. Vergleich der aktivierten Voxelanzahl beim Tapping mit der rechten Hand von Kleinem Finger (KF), Daumen (D) und der Hand (H) für die kontralaterale Seite (d) und die ipsilateralen Seite (e) gemittelt über alle Gruppen. Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung) 242
- Abbildung 19.7:**(a) bis (c) Darstellung der Interaktion „Lateralität * bewegter Finger“. Gezeigt ist der jeweilige Haupteffekt „Lateralität“ für die Ausprägung des Faktors „bewegter Finger“. Vergleich der aktiven Voxel beim Tapping mit der linken Hand zwischen der kontralateralen und ipsilateralen Seite gemittelt über alle Gruppen für die Ausprägungen Daumen (a), Kleiner Finger (b) und Hand (c). Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung) 244
- Abbildung 19.8:** Darstellung des Haupteffektes „bewegter Finger“. Vergleich der Anzahl der Voxel für die kontra- und ipsilaterale Hemisphäre über alle Gruppen für die Ausprägungen Hand (H), Kleiner Finger (KF) und Daumen (D) (mit den entsprechenden SE als Fehlerindikator). (eigene Darstellung)..... 245
- Abbildung 19.9:**(d) bis (e):Darstellung der Interaktion „Lateralität*bewegter Finger“. Vergleich der aktivierten Voxelanzahl beim Tapping mit der linken Hand von Kleinem Finger (KF), Daumen (D) und der Hand (H) für die kontralaterale Seite (d) und die ipsilateralen Seite (e) gemittelt über alle Gruppen. Der Standardfehler (SE) ist als Fehlerindikator abgetragen. (eigene Darstellung) 246
- Abbildung 19.10:**Vergleich der euklidischen Abstände aller Gruppen. Die entsprechenden Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren abgetragen. EA = euklidischer Abstand; GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2 (eigene Darstellung) 247
- Abbildung 19.11:** Vergleich der gebildeten Quotienten zwischen beiden Händen über die Gruppen. li / re = links / rechts ; re / li = rechts / links; GL = Gehörlose; K1 = Kontrollgruppe 1, D = Gebärdensprachdolmetscher, K2 = Kontrollgruppe 2 (eigene Darstellung) .. 250
- Abbildung 20.1:**Zusammenrücken der signifikanten Schwerpunkte bei Ausbreitung von Repräsentationsarealen (dargestellt auf dem Gyrus praecentralis).(eigene Darstellung) 255
- Abbildung 21.1:**Schematische Darstellung aktivierter und nicht aktivierter Hirnareale der vier Gruppen. Dargestellt sind die sechs Hirnareale, die hypothesengeleitet untersucht wurden..... 269

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der häufigsten Ursachen von Hörschäden (Quelle: in Anlehnung an Boenninghaus, 1993; Probst et al., 2004; Internetadresse IV, 2004)	6
Tabelle 5.1: Signalintensitäten verschiedener Gewebe bei T1- und T2-gewichteten Bildern (Quelle: modifizierte Tabelle aus Weishaupt, Köchli & Marincek, S. 16, 2001)	42
Tabelle 5.2: Stichprobencharakteristika der Gruppen <i>Gehörlose</i> und <i>Kontrollgruppe 1</i>	49
Tabelle 5.3: Stichprobencharakteristika der Gruppen <i>Gebärdensprachdolmetscher</i> und <i>Kontrollgruppe 2</i>	51
Tabelle 5.4: Übersicht der technischen Parameter für die T1- und T2*-gewichteten Messungen	61
Tabelle 5.5: Referenzebenen des TALAIRACH-Koordinatensystems (modifiziert nach Halber, 1995)	71
Tabelle 5.6: Stimuliprotokoll für das Bilder- und Tappingparadigma	73
Tabelle 6.1: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gehörlosen</i>	88
Tabelle 6.2: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 1</i>	89
Tabelle 6.3: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Gehörlose</i> und <i>Kontrollgruppe 1</i> (GL > K1)	90
Tabelle 6.4: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gebärdensprachdolmetscher</i>	91
Tabelle 6.5: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 2</i>	92
Tabelle 6.6: Aktivierungen im Wernicke-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Gebärdensprachdolmetscher</i> und <i>Kontrollgruppe 2</i> (D > K2)	93
Tabelle 6.7: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gehörlosen</i>	102
Tabelle 6.8: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 1</i>	103
Tabelle 6.9: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Kontrollgruppe 1</i> und <i>Gehörlose</i> (K1 > GL)	104
Tabelle 6.10: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gebärdensprachdolmetscher</i>	105
Tabelle 6.11: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 2</i>	106
Tabelle 6.12: Aktivierungen im Broca-Areal bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Kontrollgruppe 2</i> und <i>Gebärdensprachdolmetscher</i> (K2 > D)	107
Tabelle 6.13: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gehörlosen</i>	112

Tabelle 6.14: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 1</i>	113
Tabelle 6.15: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Kontrollgruppe 1</i> und <i>Gehörlose (K1 > GL)</i>	114
Tabelle 6.16: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gebärdensprachdolmetscher</i>	115
Tabelle 6.17: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 2</i>	116
Tabelle 6.18: Aktivierungen im ventralen Pfad bei Kontrastierung zwischen den Gruppen <i>Kontrollgruppe 2</i> und <i>Gebärdensprachdolmetscher (K2 > D)</i>	117
Tabelle 6.19: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gehörlosen</i>	122
Tabelle 6.20: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 1</i>	123
Tabelle 6.21: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der Gruppe der <i>Gebärdensprachdolmetscher</i>	124
Tabelle 6.22: Aktivierungen im Gyrus praecentralis bei Kontrastbildung zwischen verschiedenen Bedingungen innerhalb der <i>Kontrollgruppe 2</i>	125
Tabelle 10.1: Erläuterungen zu einer Talairach-Tabelle zur Verdeutlichung der Aktivierungen	170
Tabelle 10.2: Aktivierungen in den Gyri temporales transversi (= primärer auditiver Kortex) für die Vergleiche <i>Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose</i>	172
Tabelle 10.3: Aktivierungen im Gyrus temporalis superior (= sekundärer auditiver Kortex) für die Vergleiche <i>Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose</i>	173
Tabelle 10.4: Aktivierungen im Gyrus temporalis superior (= sekundärer auditiver Kortex) für die Vergleiche <i>Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher > Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 2 > Dolmetscher</i>	175
Tabelle 14.1: Aktivierungen im dorsaler Pfad (= superioren parietalen Kortex) für die Vergleiche <i>Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose</i>	193
Tabelle 14.2: Aktivierungen im ventralen Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis) für die Vergleiche <i>Gehörlose versus Baseline; Kontrollgruppe 1 versus Baseline; Gehörlose > Kontrollgruppe 1; Kontrollgruppe 1 > Gehörlose</i>	194
Tabelle 14.3: Aktivierungen im dorsaler Pfad (= superioren parietalen Kortex) für die Vergleiche <i>Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher > Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 2 > Dolmetscher</i>	195
Tabelle 14.4: Aktivierungen im ventralen Pfad (= Teil des Gyrus fusiformis) für die Vergleiche <i>Dolmetscher versus Baseline; Kontrollgruppe 2 versus Baseline; Dolmetscher > Kontrollgruppe 2; Kontrollgruppe 2 > Dolmetscher</i>	195
Tabelle 19.1: Lokalisation und Größe der individuellen Finger- bzw. Handrepräsentationen in M1 beim Tapping mit der rechten Hand, gemittelt über alle Individuen der Gruppe	236

Tabelle 19.2: Lokalisation und Größe der individuellen Finger- bzw. Handrepräsentationen in M1 beim Tapping mit der linken Hand, gemittelt über alle Individuen der Gruppe	236
Tabelle 19.3: Abstände zwischen den individuellen Fingerrepräsentationen (D1 und D5) im primärmotorischen Kortex (in Millimetern)	247
Tabelle 19.4: Übersicht der Quotienten linke Hand / rechte Hand und rechte Hand / linke Hand	249
Tabelle 21.1: Tabellarische Übersicht der Hypothesen und wichtigsten Ergebnisse des Bilder-Paradigmas für alle vier Gruppen.....	259

Formelverzeichnis

Formel 5.1	Formel zur Berechnung des Allgemeinen Linearen Modells.....	77
Formel 6.1	Formel zur Berechnung des Lateralitätsindex.....	96
Formel 18.1	Formel zur Berechnung des euklidischen Abstandes zwischen zwei Punkten	233

Ulrike Liebisch
Dornburger Straße 32
07743 Jena
liebisch@sporttherapeut.de

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name, Vorname:	Liebisch, Ulrike	
Geburt:	Jena, 17.03.1979	
Staatsangehörigkeit:	Deutsch	
Familienstand:	ledig	
Familie:	Karl – Heinz Liebisch	Dipl. Physiker
	Gitta Liebisch	Dipl. Lehrerin
	Bruder Matthias Liebisch	Dipl. Informatiker

Schulbildung

1985 – 1987:	Oberschule „Wilhelm Pieck“
1987 – 1991:	Oberschule „Edwin Hoernle“
1991 – 1997:	naturwissenschaftliches Gymnasium „Ernst Abbe“ Leistungsfächer Mathematik / Biologie
Juni 1997:	Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife (Note: 2,2)

Ausbildung - Sporttherapeut

Oktober 1997:	Studium Sportlehrerin mit den Schwerpunkten Prävention, Therapie und Rehabilitation (Sporttherapeut) an der Martin-Luther-Universität Halle / Saale
September 1999:	Abschluss Vordiplom (Note: 1,7)
Januar 2002:	Abschluss Diplom (Note: 1,1)
seit März 2002:	Erhalt eines Graduiertenstipendiums und Beginn einer interdisziplinären Promotion in der Sportwissenschaft / Medizin / Biologischen und Klinischen Psychologie
November 2005	Abschluss der Promotionsarbeit (Prädikat: summa cum laude)

Ausbildung - Gebärdensprachdolmetscher

10 / 1998 – 10 / 2001:	Ausbildung zur Gebärdensprachdolmetscherin an der Landesdolmetscherzentrale in Halle / Saale
November 2001:	Hauptabschlussprüfung
Januar 2002:	Abschluss Gebärdensprachdolmetscherin für Sachsen-Anhalt mündliche Note: „gut“ schriftliche Note: „befriedigend“
01 / 2002 – 04 / 2002:	Anstellung als Gebärdensprachdolmetscherin in Schwerin
seit Januar 2002:	freiberufliche Honorartätigkeit als Gebärdensprachdolmetscherin in der Landesdolmetscherzentrale Halle / Saale
seit November 2003:	freiberufliche Honorartätigkeit als Gebärdensprachdolmetscherin in der Landesdolmetscherzentrale Erfurt

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die geltende Promotionsordnung bekannt ist und ich die vorliegende Dissertation selbst angefertigt habe. Ich habe dabei weder die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen, noch haben mich andere Personen entgeltlich oder unentgeltlich unterstützt. Alle von mir verwendeten Hilfsmittel und Quellen sind in der Arbeit aufgeführt.

Die Dissertation wurde weder in dieser noch in ähnlicher Form als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung vorgelegt, noch habe ich gegenwärtig oder früher eine Dissertation an einer anderen Hochschule oder Fakultät eingereicht.

Jena, den 11. Juli 2005

Ulrike Liebisch