

Aus der Klinik für Neurologie
der medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Zweisprachigkeit:
Die unterschiedliche Auswirkung
von parallelem und sequentiellm Spracherwerb auf
die kortikale Organisation der Sprache;
eine fMRT Studie**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Inken-Ulrike Wagelaar
aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. A. Villringer
2. Prof. Dr. phil. R. DeBleser
3. Prof. Dr. phil. M. Krifka

Datum der Promotion: 01.06.2008

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
1 VORWORT	1
2 LINGUISTISCHE UND PSYCHOLINGUISTISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 Der kindliche Spracherwerb	2
2.1.1 Anfänge der Sprachrezeption und Sprachproduktion	2
2.1.2 Erlernen der Grammatik	2
2.1.3 Semantik und Grammatik	3
2.1.4 Theorien zum Spracherwerb	3
2.1.4.1 Der Behaviorismus	3
2.1.4.2 Der Nativismus	3
2.1.4.3 Der Kognitivismus	4
2.2 Der Zweitspracherwerb	4
2.2.1 Die „kritische Phase“ oder „sensible Phase“	4
2.2.2 Die „sensible Phase“ beim Zweitspracherwerb	6
2.2.3 Paralleler Zweitspracherwerb	6
2.2.4 Theorien zum Bilingualismus	7
2.2.5 Später Zweitspracherwerb	7
3 NEUROLINGUISTISCHE GRUNDLAGEN	9
3.1 Sprache und Gehirn	9
3.1.1 Frühe Sprachforschung	9
3.1.1.1 Die klassischen Sprachareale	10
3.1.2 Lateralisierung	11
3.1.2.1 Plastizitätstheorie	11
3.1.3 Moderne Techniken zur Lokalisation sprachrelevanter Gehirnareale	12
3.1.4 Zweisprachigkeit	12
3.1.4.1 Repräsentieren sich die einzelnen Sprachen in unterschiedlichen Arealen?	13
4 FRAGESTELLUNG, HYPOTHESEN UND ZIEL DER ARBEIT	18
4.1 Fragestellung	18

4.2	Hypothesen	19
4.3	Zielsetzung	19
5	BIOPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN UND METHODEN	21
5.1	Methodik der funktionellen Magnetresonanztomographie	21
5.1.1	Magnetresonanztomographie (MRT)	21
5.1.1.1	Der BOLD-Effekt (Blood-Oxygenation-Level-Dependent-Effect).....	22
5.1.2	Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)	24
5.2	Material und Methoden	25
5.2.1	Probanden	25
5.2.2	Versuchsaufbau	27
5.2.2.1	Aktivierungsmaterial.....	27
5.2.2.2	Darbietung des Satzmaterials.....	28
5.2.2.3	Aufgabenstellung	29
5.2.3	Versuchsdurchfuehrung	29
5.2.4	Datenanalyse	30
5.2.5	Darstellung der Ergebnisse	32
5.2.6	Anmerkung zu den Daten	32
6	ERGEBNISSE	33
6.1	Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau (EAHP)	33
6.1.1	Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (EAHP)	33
6.1.1.1	Grammatik	34
6.1.1.2	Semantik	35
6.1.2	Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (EAHP)	37
6.1.2.1	Grammatik	37
6.1.2.2	Semantik	37
6.1.2.3	Zusammenfassung.....	40
6.2	Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau (LAHP)	40
6.2.1	Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (LAHP)	40
6.2.1.1	Grammatik	41
6.2.1.2	Semantik	43
6.2.2	Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (LAHP)	45

6.2.2.1	Grammatik	46
6.2.2.2	Semantik	47
6.2.2.3	Zusammenfassung.....	50
6.3	Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Leistungsniveau (LALP)...	51
6.3.1	Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (LALP)	51
6.3.1.1	Grammatik	52
6.3.1.2	Semantik	54
6.3.2	Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (LALP-Gruppe).....	56
6.3.2.1	Grammatik	57
6.3.2.2	Semantik	59
6.3.2.3	Zusammenfassung.....	61
7	DISKUSSION.....	62
7.1	Einleitung.....	62
7.1.1	Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse	62
7.2	Alter bei Zweitspracherwerb	63
7.2.1	Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Grammatik	63
7.2.1.1	Unterschiede bei parallelem und seriellem Zweitspracherwerb	63
7.2.2	Differenzen zwischen parallelem und seriellem Spracherwerb.....	66
7.2.2.1	Paralleler Spracherwerb (früher Zweitspracherwerb).....	66
7.2.2.2	Serieller Spracherwerb (später Zweitspracherwerb).....	67
7.2.3	Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Semantik-Verarbeitung	68
7.2.3.1	Vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik.....	69
7.2.4	Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Sprachverarbeitung	69
7.2.4.1	Aktivierte Areale im rechten Frontal- und im linken Parietallappen.....	69
7.3	Leistungsniveau.....	71
7.3.1	Einfluss des Leistungsniveau auf die Grammatik-Verarbeitung	71
7.3.2	Einfluss des Leistungsniveaus auf die Semantikverarbeitung.....	71
7.3.2.1	Separat aktivierte Areale im linken Frontal- und Temporallappen	71
7.3.2.2	Vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik.....	74
7.3.2.3	Aktivierung des Gyrus fusiformis.....	78
7.3.3	Einfluss des Leistungsniveaus auf die Sprachverarbeitung.....	78
7.3.3.1	Vermehrte Aktivierung durch niedriges Leistungsniveau	78

	7.3.3.2	Aktivierung von extrakortikalen Strukturen	79
8		SCHLUSSFOLGERUNGEN	80
9		ZUSAMMENFASSUNG	83
10		ABSTRACT	83
11		LITERATURHINWEISE	84
12		EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	i
13		DANKSAGUNG.....	ii
14		CURRICULUM VITAE	iii

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AoA	Age of Acquisition = Alter bei Spracherwerb
BA	Brodman-Areal
BOLD-Effekt	Blood-Oxygenation-Level-Dependent-Effect = Blut-Oxygenierungsgrad-abhängiger-Effekt
BOLD-Kontrast	Blood-Oxygenation-Level-Dependent-Contrast = Blut-Oxygenierungsgrad-abhängiger-Kontrast
CBF	Cerebral Blood Flow = zerebraler Blutfluss
CBV	Cerebral Blood Volume = zerebrales Blutvolumen
CMR	Cerebral Metabolism Rate = Zerebrale Metabolisationsrate
EAHP	Early Acquisition High Proficiency = Früher Spracherwerb mit hohem Leistungsniveau
EEG	Elektro-Encephalo-Graphie
EPI	Echo-Planar-Imaging = echoplanare Bildgebung
ERP	Event-Related-Potentials = Ereignis korrelierte Potentiale
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
L1	Language 1 = Erstsprache
L2	Language 2 = Zweitsprache
LAHP	Late Acquisition High Proficiency = Später Spracherwerb mit hohem Leistungsniveau
LALP	Late Acquisition Low Proficiency = Später Spracherwerb mit niedrigem Leistungsniveau
MEG	Magnet Encephalo-Graphie
MP-RAGE	Magnetized Prepared Rapidly Acquired Gradient Echo = magnetisch präpariertes, schnell erworbenes Gradienten-Echo
MRT	Magnet-Resonanz-Tomographie
NMR	Nukleare Magnet Resonanz
PET	Positronen Emissions Tomographie
PL	Proficiency Level = Leistungsniveau
rCBF	regional Cerebral Blood Flow = regionaler zerebraler Blutfluss
rCBV	regional Cerebral Blood Volume = regionaler zerebrales Blutvolumen
SD	Standard Deviation = Standardabweichung
SMA	Supplementär Motorischer Kortex
T1	Relaxationszeit 1
T2	Relaxationszeit 2
T2*	Relaxationszeit 2*

1 VORWORT

Mit der in den letzten Jahrzehnten immer schneller werdenden Verbreitung der Mehrsprachigkeit bedingt durch die Medien, die neueren Transportmittel und der damit verstärkten Vermischung von Völkern und Sprachen, wird diese auch auf dem Gebiet der Forschung zu einem immer wichtigeren Thema.

Das Alter bei Zweitspracherwerb wurde schon seit einigen Jahrzehnten als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Zweitsprache diskutiert. Aus diesem Grund wurde seit den siebziger Jahren zwischen parallelem und sequentiellm Zweitspracherwerb unterschieden (Cooper, 1971).

In den vergangenen Jahrzehnten ist das Interesse der kognitiven Neurowissenschaft an der Zweisprachigkeit gewachsen. Es stellen sich verstärkt Fragen zur Lokalisation und Verarbeitung mehrerer Sprachen im menschlichen Gehirn. Diese Fragen finden auch auf den Gebieten der Aphasie-Rehabilitation, der Tumor- wie Epilepsiechirurgie und der Erforschung von Sprachstörungen und eventuellen Therapiemöglichkeiten ein immer größeres Interesse.

Fragen zum Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb und des Leistungsniveaus auf die kortikale Struktur der Sprachverarbeitung standen in den letzten Jahren im Vordergrund. Dabei wurde in bildgebenden Studien die Möglichkeit außer Acht gelassen, dass die einzelnen Sprachprozesse, z.B. Grammatik und Semantik durch das Alter bei Zweitspracherwerb und durch das Leistungsniveau unterschiedlich beeinflusst werden könnten. In einer Studie von Weber-Fox und Neville konnten jedoch mittels ereigniskorrelierter Potentiale deutlich unterschiedliche Auswirkungen des Alters und des Leistungsniveaus bei Zweitspracherwerb auf die Grammatik- und die Semantikverarbeitung dargestellt werden (Weber-Fox & Neville, 1996).

Es stellt sich somit die Frage, ob sich der Einfluss des Alters bei Spracherwerb und des Leistungsniveaus auch auf die kortikale Organisation der Sprachareale auswirkt und mit der fMRT darstellbar ist.

2 LINGUISTISCHE UND PSYCHOLINGUISTISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Der kindliche Spracherwerb

2.1.1 Anfänge der Sprachrezeption und Sprachproduktion

In der Psycholinguistik wird davon ausgegangen, dass der Spracherwerb schon vor der Geburt beginnt, da die Kinder schon im Mutterleib die in ihrer Umgebung gesprochene Sprache wahrnehmen. In einer Studie mit vier Tage alten Kindern konnte dargestellt werden, dass diese mit intensiverem Saugen reagierten, sobald ein Tonband in der Sprache ihrer Mutter abgespielt wurde. Auf Tonbänder in einer anderen Sprache reagierten sie nicht in dieser Weise, auch nicht auf ein Band in ihrer Muttersprache, das rückwärts abgespielt wurde (Mehler et al., 1968). Weiter konnte gezeigt werden, dass die phonetische Perzeption eines Kindes schon nach sechs Monaten, also schon lange vor dem Erlernen einer spezifischen Grammatik durch die Sprache beeinflusst ist, dem das Kind ausgesetzt wurde (Kuhl et al., 1992). Mit sechs Monaten werden dann die ersten Wörter mit ihrer Bedeutung, bzw. den entsprechenden Personen in Verbindung gebracht (Mama und Papa, u.a.). Nach dieser Phase, in der das Kind lernt, dass bestimmte Lautfolgen mit Personen, Dingen oder Aktivitäten verbunden sind, beginnt es die Laute der Umgebung nachzuahmen. Dies geschieht zunächst durch ein Lallen und bis zum Ende des ersten Lebensjahrs durch die Aussprache der ersten Wörter (Kegel, 2000).

2.1.2 Erlernen der Grammatik

Nach der Bildung von einzelnen Wörtern, von einigen Wissenschaftlern aufgrund ihrer unterschiedlichen Aussage auch Ein-Wort-Sätze genannt, verbindet das Kind mit etwa achtzehn Monaten die gelernten Begriffe miteinander. Mit den so genannten Zwei-Wort-Sätzen kommt es zu einer einfachen Grammatik, das Kind beginnt das Verhältnis der Wörter zueinander zu verstehen und diese aktiv untereinander in Beziehung zu setzen (Peters, 1986). Gegen Ende des zweiten Lebensjahres beginnt das Kind Sätze aus drei Wörtern zu bilden und sich so weitere grammatikalische Möglichkeiten zu erschließen. Im vierten Lebensjahr fängt das Kind an Satzstrukturen zu verknüpfen. Der allgemeinen Ansicht nach, ist das Erlernen der Grammatik bis zum fünften Geburtstag abgeschlossen. Einige komplizierte Grammatikstrukturen werden jedoch erst später, mit zehn, elf Jahren wirklich erfasst (Bates et al., 1992).

2.1.3 Semantik und Grammatik

Semantik: Die Beziehung(en) von Zeichen zur Welt.

Die Semantik ist der Teil der Linguistik, der sich mit dem Inhalt, dem Sinn und der Bedeutung von Zeichen befasst. Gottlob Frege (1848-1925) definierte die Worte Sinn und Bedeutung folgendermaßen:

Sinn: die Aspekte des Inhalts, die sich aus der Relation der Wörter und Sätze untereinander im System der Sprache ergibt.

Bedeutung: die Aspekte des Inhalts, die sich aus der Relation zwischen den Zeichen und der Welt ergeben (Frege, 1892).

Grammatik: Sie umfasst die Phonologie (Lautlehre), die Morphologie (Formenlehre) und die Syntax (Satzlehre).

Die Grammatik ist eine Sammlung von Regeln, wie die Elemente einer tiefer liegenden Ebene der Sprache auf weiter oben liegender Ebene verknüpft werden, zum Beispiel Wörter zu Sätzen.

2.1.4 Theorien zum Spracherwerb

2.1.4.1 Der Behaviorismus

Burrhus Frederic Skinner (1904-1990) war der prominenteste Vertreter des radikalen Behaviorismus. Das Erlernen einer Erstsprache wurde lange Zeit als Erwerb durch ein Reiz-Reaktions-Verhalten verstanden. Das Kind lernt demnach sprechen, indem es die Laute und Lautfolgen der Personen in seiner Umgebung imitiert. Durch die Reaktionen seiner Umwelt auf diese Lautäußerungen wird es in der Benutzung bestärkt oder korrigiert.

2.1.4.2 Der Nativismus

In den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde die Idee von einem angeborenen Sprachmechanismus entwickelt. Man ging davon aus, dass sich sprachliche Fähigkeiten automatisch dann aktivieren, wenn das Kind mit Sprache in Berührung kommt, und ein grundlegendes Wissen über Sprache bereitstellen, auf dem dann Sätze gebildet werden können. Der wichtigste Vertreter dieser Theorie war der Linguist Noam Chomsky (1928-). Chomsky beschrieb dieses grundlegende angeborene Sprachwissen als Universalgrammatik.

Diese ist für alle Sprachen gleichermaßen gültig. Auf dieser Universalgrammatik bauen sich die spezifischen syntaktischen Regeln der Muttersprache auf (Chomsky, 1957).

Im Allgemeinen waren die Theorien zur angeborenen Sprachfähigkeit und über deren genaue Struktur sehr umstritten und lösten zahlreiche kontroverse Erklärungen aus. Eine mögliche Erklärung lieferte der Kognitivismus.

2.1.4.3 Der Kognitivismus

Dieser erklärt den Spracherwerb im Zusammenhang mit der intellektuellen Reife des Kindes. Der wichtigste Vertreter dieser Theorie war der Psychologe Jean Piaget (1896-1980). Er ging davon aus, dass sich sprachliche Kompetenz erst dann entwickelt, wenn auf vorhandene kognitive Grundlagen zurückgegriffen werden kann.

2.2 Der Zweitspracherwerb

Der Erwerb einer Zweitsprache unterscheidet sich grundlegend von dem der Erstsprache. Während ein Kind beim Erlernen der Muttersprache eine ihm neue Art der Kommunikation erwirbt, kann der Erwerb einer Zweitsprache nach einem bestimmten Alter auf den schon vorhandenen Zusammenhängen, Regeln und Sprachstrukturen aufbauen (Braine, 1987). Auch die semantische Entwicklung während des Erwerbs einer weiteren Sprache verläuft sehr viel schneller als bei der Erstsprache, da nur die passenden Wörter zu den schon verstandenen Begriffen erlernt werden müssen, nicht aber die weltlichen Zusammenhänge (Gillis, 1975; Oksaar, 2003).

Unumstritten ist auch, dass die unterschiedlichen Sprachfertigkeiten einer Zweitsprache nach einem bestimmten Alter nicht mehr in dem Maße gelernt werden können, wie es beim Erstspracherwerb, beim parallelen Erlernen zweier Sprachen in frühesten Kindheit und beim frühen Zweitspracherwerb der Fall ist. Es stellt sich somit die Frage nach der Altersgrenze, mit der man den so genannten späten vom frühen Zweitspracherwerb unterscheidet.

2.2.1 Die „kritische Phase“ oder „sensible Phase“

Der amerikanische Psycholinguist Eric Lenneberg (1921-1975) übertrug den aus der Ethologie stammenden Begriff der „kritischen Periode“ auf den Spracherwerb.

Forscher hatten festgestellt, dass Tieren bestimmte Reize in einem zeitlich festgelegten Zeitraum zum Erwerb von bestimmten Fertigkeiten angeboten werden müssen, damit eine normale Entwicklung garantiert ist. Werden die Tiere in dieser Phase nicht dem entsprechenden Reiz ausgesetzt, geht die Möglichkeit verloren, die mit dem Reiz

verbundene Fähigkeit zu erlangen. Somit bezeichnet der Begriff „kritische Phase“ einen begrenzten Zeitraum, in dem eine bestimmte Fähigkeit erlernt werden muss. Wird diese Phase verpasst, kann das jeweilige Können nicht mehr oder nur noch unvollständig erlernt werden. Lenneberg ging davon aus, dass dies auch auf den Spracherwerb zutrefte. Er stellte die Hypothese auf, dass die Sprache ein Ergebnis der Gehirnreifung ist. Die Lateralisierung der Sprachareale finde erst mit der Sprachentwicklung statt und sei mit der Pubertät abgeschlossen.

In der Kindheit, so wurde von de Ajuriaguerra angenommen, weise das Gehirn noch keine Sprachdominanz auf und die rechte Hemisphäre sei in einem gewissen Maß an der Sprache beteiligt. Wenn es in der Kindheit nicht zu einer Störung der entwicklungsbedingten Polarisation von Funktionen komme, würden die Sprachfunktionen vollständig in die linke Hemisphäre verschoben. Komme es bis zum 13. Lebensjahr zu einer Verletzung der linken Hemisphäre, sei eine Verschiebung der für die Sprache wichtigen Strukturen in die rechte Hemisphäre möglich (Ajuriaguerra de, 1957). Lenneberg schloss daraus, dass ein Erstspracherwerb in allerdings immer geringerem Ausmaß bis zum 13. Lebensjahr möglich sei. Die Beobachtung, dass Kinder, die bis zur Pubertät ohne Sprache aufwuchsen, nicht in der Lage waren, eine Sprache vollständig zu erlernen bestärkte Lenneberg in seiner Theorie. Auf dieser Basis legte er die kritische Phase in den Zeitraum vom 2. Lebensjahr bis zur Pubertät. Er begründet das Ende der kritischen Phase für den Spracherwerb mit der vollständig vollzogenen zerebralen Lateralisierung der Sprachfunktionen. Lenneberg schloss die Übernahme der Sprachfähigkeiten in die rechte Hemisphäre im Falle einer Läsion der linken Hirnhälfte nach der Pubertät aus (Lenneberg, 1967, 1969).

Diese Theorie konnte jedoch zum Teil widerlegt werden. Kinsbourne und Papcun zeigten, dass eine Sprachlateralisierung schon in der frühen Kindheit und eventuell schon ab der Geburt besteht (Papcun et al., 1974; Kinsbourne, 1975).

Im Rahmen der Forschung zum Zweitspracherwerb wurde der Begriff „kritische Phase“ von Gordon durch „sensible Phase“ ersetzt, da diese Phase der optimale Zeitraum sei, in dem ein Kind eine Zweitsprache leicht und vollständig erlernen könne (Gordon, 2000).¹

¹ Des Weiteren soll der Begriff „sensible Phase“ verwendet werden.

2.2.2 Die „sensible Phase“ beim Zweitspracherwerb

Johnson weitete Lennebergs Hypothese auf den Zweitspracherwerb aus. Er fand bei Untersuchungen mit grammatikalischen Entscheidungsaufgaben eine lineare Abnahme der Sprachfähigkeit mit dem Alter des Erwerbs bis zur Pubertät (Johnson & Newport, 1989 und 1991). Beim Spracherwerb nach der Pubertät zeigte sich ein wesentlich niedrigeres Leistungsniveau, das nicht mehr vom Alter des Erwerbs abhängig war. In der Gruppe, die die Zweitsprache im Alter von 3-7 Jahren erlernt hat, zeigte sich ein Niveau, das dem von Erstsprachlern gleichkam.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass das Alter zu Beginn des Erwerbs einer Zweitsprache Auswirkung auf das spätere Leistungsniveau habe, beschrieb Cooper es als logische Konsequenz, dass man beim frühen Spracherwerb zwischen simultanem (gleichzeitigem) und sequentiell (aufeinander folgendem) Spracherwerb unterscheidet (Cooper, 1971).

McLaughlin nannte einen Erwerb von mehr als einer Sprache dann simultan, wenn er innerhalb der ersten drei Jahre erfolgt (McLaughlin, 1978). 1984 wurde diese Einteilung von Padilla als nicht streng genug beurteilt und gefordert, nur dann von simultanem Bilingualismus zu sprechen, wenn das Kind seit der Geburt beiden Sprachen ausgesetzt gewesen sei (Padilla, 1984). Als Gründe für diese strenge Einteilung nannte sie die Tatsache, dass alles, was in der einen Sprache erlernt wird Folgen auf das Erlernen der anderen Sprache haben müsse. Weiter wies sie darauf hin, dass es nur auf diese Weise möglich sei, die beiden Sprachen direkt mit der Sprache bei einfachem Erstspracherwerb zu vergleichen.²

2.2.3 Paralleler Zweitspracherwerb

Kinder, die in der für Sprache sensiblen Phase mehr als nur einer Sprache ausgesetzt sind, erlernen diese gleichzeitig. Trotz der wesentlich größeren Anzahl von Phonemen, Wörtern, syntaktischen Strukturen und Regeln scheint das die Sprachkapazität des Kindes nicht zu überschreiten. Der parallele Erwerb zweier Sprachen verläuft etwas anders als der nur einer Sprache. Zu Beginn greifen zweisprachige Kinder wie Einsprachige eine Menge von Worten auf. Im Gegensatz zu Monolingualen stammen diese Worte jedoch aus beiden/

² In dieser Arbeit werden die Bezeichnungen „paralleler“ und „früher“ Zweitspracherwerb synonym verwendet.

mehreren Sprachen. In Beobachtungsstudien konnte gezeigt werden, dass sich Kinder in den ersten Jahren des Spracherwerbs nicht darüber bewusst sind, dass sie zwei verschiedene Sprachen erlernen (Dopke, 1998). Beginnt das Kind nun mit der Satzbildung, kommt es zu einer Vermischung der Sprachen, die mit der Zeit zurückgeht. Sind zu Beginn des dritten Lebensjahres noch circa 30% der Sätze gemischt, so sind es zum Ende des vierten Lebensjahres nur noch circa 5% (Mehlem, 1998).

2.2.4 Theorien zum Bilingualismus

Das Vermischen der Sprachen während des parallelen Spracherwerbs führte in den 70er Jahren zu der Theorie, es entwickle sich bei frühem Spracherwerb vorerst nur ein gemeinsames Sprachsystem, und es komme erst im Verlauf der Sprachentwicklung zu einer Trennung.

Volterra und Taeschner entwickelten 1978 das Drei-Phasen-Modell des parallelen Spracherwerbs. Danach benutzt das lernende Kind in der ersten Phase ein lexikalisches System mit Worten aus beiden Sprachen. In der zweiten Phase findet eine Trennung der lexikalischen Systeme für die jeweiligen Sprachen statt, wobei jedoch dieselben grammatikalischen Regeln auf beide Sprachen angewandt werden. Erst in der dritten Phase kommt es zu einer klaren Trennung des semantischen und des grammatikalischen Systems für beide Sprachen (Volterra & Taeschner, 1978).

Dieses Modell ist in den späten 80er Jahren wiederholt angefochten worden und Genesee und andere sahen das Vermischen der Sprachen als Beweis für die Behauptung, dass sich von Anfang an zwei Sprachsysteme entwickelten (Genesee, 1989). In weiteren Studien konnte gezeigt werden, dass das Vermischen der Sprachen deutlich vom Gesprächspartner abhängt, und in den letzten Jahren hat sich die Hypothese entwickelt, dass Kinder schon von Anfang an die Sprachen unterscheiden können (Genesee et al., 1996; Meisel, 2004).

Anhand dieser Beobachtungen entwickelte Grosjean das Konzept der unterschiedlichen Sprachmodi (einsprachiger und mehrsprachiger Sprachmodus). Er erklärte das Vermischen der Sprachen, vor allem zu Beginn des frühen parallelen Spracherwerbs damit, dass Kinder erst im Verlauf des Spracherwerbs die Fähigkeit entwickelten, in nur einer Sprache zu sprechen (monolingual-mode) (Grosjean, 2001).

2.2.5 Später Zweitspracherwerb

Sprachen können auch nach der eigentlich „sensiblen Phase“ erlernt werden. Kinder können noch in der späten Kindheit Fremdsprachen erlernen und ebenso ist es auch für

Jugendliche und Erwachsene möglich weitere Sprachen zu erlernen. Meist geschieht dies im Rahmen eines Fremdsprachen-Unterrichts. Bei spätem Zweitspracherwerb stehen dem Sprecher zu Beginn des Spracherwerbs bei guten Sprachkenntnissen in der Erstsprache nur wenige Worte und unvollständige Grammatikkenntnisse in der neuen Sprache zu Verfügung. Um diese Defizite auszugleichen versucht der Sprecher die fehlenden Sprachkenntnisse durch kompensatorische Strategien, wie Umschreibungen von Worten und durch die Anwendung von Grammatikstrukturen aus der Erstsprache bzw. einer gut beherrschten Zweitsprache auszugleichen. Zu den kompensatorischen Strategien zählen die pragmatische Kompetenz³ und das metalinguistische Wissen⁴ (Poulisse, 1990; Paradis, 1998).

³ Pragmatik: Die Beziehung(en) von Zeichen zu den Erzeugern und Interpreten von Zeichen.

Die Pragmatik bezieht sich auf die Verbindung zwischen Sprache und Denken und der Verbindung des Gesagten oder Geschriebenen zu den Konsequenzen, die daraus hervorgehen.

⁴ Metasprache: Die Funktion einer Sprache, sich auf Sprache selbst zu beziehen. Sie umfasst das Wissen über eine Sprache.

3 NEUROLINGUISTISCHE GRUNDLAGEN

3.1 Sprache und Gehirn

3.1.1 Frühe Sprachforschung

Der französische Chirurg und Anthropologe Pierre Paul Broca (1824-1880) beschrieb im Jahre 1861 einen Patienten, der seit seiner Kindheit bei gutem Sprachverständnis nur das Wort „TAN“ sagen konnte. Nach dessen Tod konnte Broca eine Läsion des inferioren frontalen Gyrus im linken frontalen Kortex nachweisen. Diese Region wurde daraufhin nach ihm „Broca-Region“ genannt. Die Zuordnung dieser, der in einer 1861 veröffentlichten Darstellung beschriebenen motorischen Sprachstörung, zu dem von Broca definierten Hirnareal löste heftige Diskussionen aus und kann als Beginn der modernen Neurolinguistik angesehen werden (Broca,1861). Mit Broca und dem Neuroanatom Joseph Gall (1758-1828) entstand die „Lokalisationslehre“. Diese baute darauf auf, dass verschiedene psychische Funktionen, unter anderem die Sprachfunktionen, unterschiedlichen Regionen des Gehirns zuzuordnen seien. Diese Theorie setzte voraus, dass kognitive Teilfunktionen isolierbar sind.

1867 beschrieb der deutsche Arzt Carl Wernicke (1848-1905) die Konsequenzen einer Läsion des später nach ihm benannten „Wernicke-Areals“. Er entwickelte die Theorie, dass es nicht nur bei der Zerstörung der spezifischen Sprachareale zu sprachlichen Defiziten komme, sondern auch durch die Schädigung der die Sprachareale verbindenden Strukturen. In der Veröffentlichung „Der aphasische Symptomenkomplex“ (1874) unterschied Wernicke mehrere Formen der Aphasie:

- die sensorische Aphasie mit vermindertem Sprachverständnis bei relativ gut erhaltener Sprechfähigkeit, durch Schädigung der Wernicke-Region
- die motorische Aphasie, die durch eine Schädigung der Broca-Region entsteht,
- die Leitungsaphasie, die durch eine Läsion der Verbindung der Wernicke- und der Broca-Region entsteht,
- die totale Aphasie bei einer Zerstörung beider Sprachareale (Wernicke, 1874).

Die Differenzen zwischen den einzelnen Theorien zur Lokalisation der Sprachfunktionen im Gehirn kommentierte der britische Neurologe John Hughlings Jackson (1835-1911), in dem er die Lokalisation des Schadens, der die Sprache zerstört, als etwas anderes als die

Lokalisation der Sprache selbst bezeichnete. In einer Veröffentlichung über Sprachstörungen aus dem Jahre 1864 nannte er die Sprache nicht nur eine „Äußerung von Worten“, sondern behauptete, dass den aphasischen Patienten die innere Sprache, der innerlich formulierte Gedanke fehle. Weder die Äußerung von Wörtern noch das Schreiben seien separate Funktionen; sie seien der inneren Sprache untergeordnet (Jackson, 1864).

Im folgenden Abschnitt sollen die klassischen Sprachareale kurz beschrieben werden.

3.1.1.1 Die klassischen Sprachareale

Broca-Areal

Die nach Broca benannte Gehirnregion lokalisiert sich auf den inferioren frontalen Gyrus im linken frontalen Kortex, wie in der folgenden Abbildung (Abbildung 1) dargestellt. Das Gebiet entspricht weitgehend der Brodmann Areale 44 und 45 (Talairach). Einige Autoren bezeichnen allerdings nur das Brodmann-Areal 44 bzw. 45 als Broca-Areal.

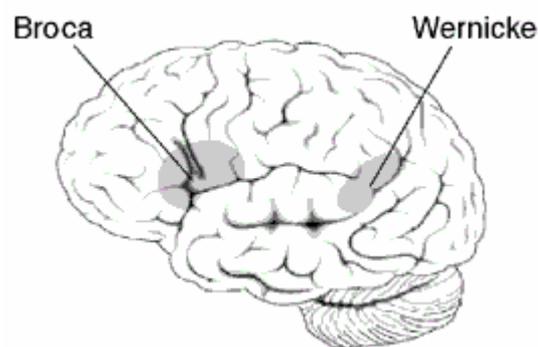


Abbildung 1:

Grafische Darstellung der klassischen Sprachareale, Broca- und Wernicke-Areal, entnommen aus <http://www.nidcd.nih.gov/health/voice/aphasia.asp>.

Wernicke-Areal

Als Wernicke-Areal wurde das Hirnareal bezeichnet, das durch Wernicke mit einer sensorischen Aphasie in Zusammenhang gebracht wurde. Es umfasst die Regionen des mittleren und posterior-superioren Gyrus sowie des superioren Sulcus temporalis (Brodmann Areale 21 und 22), wie in der vorausgehenden Abbildung (Abbildung 1) dargestellt.

3.1.2 Lateralisierung

Die Erkenntnis über die asymmetrische Lokalisation der Sprachfunktion hat zur Theoriebildung von der Major- und Minorhemisphäre beigetragen, wobei die „sprachintelligente Hemisphäre“ als Major-, die andere als Minor-Seite bezeichnet wird (Sperry, 1969). Die linke Hemisphäre ist meist für die Sprachfähigkeiten dominant. Untersuchungen an Split-Brain-Patienten zeigten jedoch, dass neben der linken Hemisphäre auch die rechte Hemisphäre an der Verarbeitung von Sprachprozessen beteiligt ist (Heeschen & Jurgens, 1977). In den letzten Jahren gab es immer mehr Beweise dafür, dass die Komplexität der sprachlichen Kommunikation nur teilweise auf die linke Hirnhälfte begrenzt ist. So zeigte Ross, dass die rechte Hemisphäre bei emotionalen Aspekten der Sprache, wie der Modulation der affektiven Komponente der Silbenbildung und der Gestik eine wichtige Rolle spielt (Ross, 1984). Auch neue bildgebende Studien zur Sprachfunktion zeigen eine Beteiligung der rechten Seite bei Sprachrezeption und -produktion (Just et al., 1996; Abdullaev, 1998).

Darüber hinaus stellte sich die Frage nach einer Symmetrie von Rechtshändigkeit und linker Sprachdominanz und ob Linkshänder eine Sprachdominanz für die rechte Hemisphäre vorweisen. Dieses ist allerdings nicht der Fall, wenn auch Linkshändigkeit häufiger als Rechtshändigkeit mit einer dominant rechtsseitigen oder beidseitigen Sprachrepräsentation verbunden ist. Eine Studie von Khedr trug zur Klärung dieser Frage die folgenden Ergebnisse bei: Von 50 mittels transkranieller Magnetstimulation untersuchten Probanden zeigten 87,5% der untersuchten Personen mit strenger Rechtshändigkeit eine Sprachdominanz für die linke Hirnhälfte, 8,2% eine bilaterale Repräsentation der Sprache und 4,2% eine Dominanz für die rechte Hemisphäre. Bei eindeutigen Linkshändern zeigte sich eine Dominanz der linken Hemisphäre in 73,7% der Probanden, in 15,8% eine zweiseitige Sprachrepräsentation und in 10,5% eine Sprachdominanz der rechten Hirnhälfte. Bei den Probanden ohne strenge Händigkeit (mit moderater Rechts-, Linkshändigkeit oder Beidhändigkeit) sind die Ergebnisse nicht so stark lateralisiert. So zeigen in dieser Gruppe 57% der Untersuchten eine beidseitige Sprachrepräsentation und 43% der Probanden eine linkslaterale Sprachdominanz (Khedr et al., 2002).

3.1.2.1 Plastizitätstheorie

In Aphasiestudien wurde beobachtet, dass bei Läsionen bestimmter Areale deren Tätigkeit von anderen Regionen übernommen werden können und dass es bei Säuglingen sogar nach

kompletter Ektomie der linken Hemisphäre zur Übernahme weitgehend aller Sprachfunktionen durch die rechte Hirnhälfte kommen kann, wobei nur leichte syntaktische Defizite vorhanden bleiben (Dennis & Whitaker, 1977).

In den folgenden Jahren und Jahrzehnten entwickelte sich die Aphasieforschung im Rahmen der Neuropsychologie sowie die Neurolinguistik zu einem anerkannten Zweig der kognitiven Neurowissenschaften. Die Bestimmung der Zusammenhänge zwischen einzelnen für die Sprachfunktionen relevanten Regionen und deren Verbindungen ist das Hauptziel der Neurolinguistik.

3.1.3 Moderne Techniken zur Lokalisation sprachrelevanter Gehirnareale

Bis in die fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts stützte sich die Lokalisation der sprachrelevanten Gebiete auf die bei der Autopsie von verstorbenen aphasischen Patienten gewonnenen Kenntnisse. Mit dem Aufkommen neuer Techniken entstand die Möglichkeit, die am Sprachprozess beteiligten Areale zuerst an der operativ freigelegten Hirnoberfläche anhand intraoperativer elektrischer Stimulation und Wada-Tests, später auch am gesunden Probanden mittels Magnetresonanztomographie zu untersuchen.

Weitere Möglichkeiten zur Darstellung von Hirnfunktionen und somit auch von Sprachaktivitäten waren mit Elektroenzephalographie oder Event Related Potentials bzw. Ereigniskorrelierte Potentiale (EEG/ ERP) schon früh möglich und konnten durch die Einführung der Positronenemissionstomographie (PET) und der funktionellen Magnetresonanztomographie ergänzt werden. Anders als das EEG oder die Magnetencephalographie (MEG) messen die PET und die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) neuronale Ereignisse nicht direkt, sondern über die Darstellungen von metabolischen Veränderungen, die mit den neuronalen Vorgängen einhergehen. Beide Verfahren haben mittlerweile in der neurophysiologischen und der neuropsychologischen Forschung sowie zunehmend auch in der Klinik weite Verbreitung gefunden. Zu den Vorteilen der fMRT gegenüber anderen bildgebenden Verfahren zählen unter anderem die Erfassung der Aktivität im Bereich des gesamten Gehirns in kurzer Zeit sowie eine hohe räumliche Auflösung.

3.1.4 Zweisprachigkeit

In den vergangenen Jahrzehnten ist das Interesse der kognitiven Neurowissenschaft an der Zweisprachigkeit gewachsen. Die drei zentralen Fragen, die sich dabei stellen, sind folgende:

- Repräsentieren sich die einzelnen Sprachen in unterschiedlichen Arealen des Gehirns?
- Welche Auswirkung hat das Alter beim Erwerb einer Sprache auf die kortikale Organisation?
- Welche Auswirkung hat das Leistungsniveau auf die kortikale Organisation?

3.1.4.1 Repräsentieren sich die einzelnen Sprachen in unterschiedlichen Arealen?

Schon frühe Aphasie-Studien zeigten, dass Verletzungen begrenzter Hirnareale bei mehrsprachigen Patienten die Sprachfähigkeit für eine Sprache mehr in Mitleidenschaft ziehen kann als die anderer Sprachen. Es gibt Fälle, bei denen nur eine Sprache alleine betroffen ist. Bei anderen Aphasie-Formen fallen unterschiedliche Bereiche der verschiedenen Sprachen oder zwischensprachliche Fähigkeiten wie Übersetzen oder die Fähigkeit von einer Sprache in die andere zu wechseln aus. 1982 beschrieb Paradis eine alternierende antagonistische Form der Aphasie-Genesung, bei der dem Patienten abwechselnd für einen Zeitraum jeweils immer nur eine Sprache zur Verfügung stand (Paradis et al., 1982). Patienten, die eine Broca-Aphasie für die eine Sprache und eine Wernicke-Aphasie für die andere Sprache zeigten, wurden von Albert und Obler beobachtet (Albert & Obler, 1978). Es wurden weiterhin Fälle beschrieben, bei denen es dem Patienten möglich war, in eine Sprache zu übersetzen, in der er spontan nicht sprechen konnte; so genanntes paradoxes Übersetzen. Auch Fälle, bei denen es dem Patienten unmöglich war in nur einer Sprache zu sprechen und zu verhindern, dass er unwillkürlich von einer in die andere Sprache wechselte (pathologisches „switching“), wurden beschrieben (Paradis 1982; Fabbro, 2000).

Aufgrund dieser großen Variabilität bei der Genesung von Aphasie-Patienten stellten sich mehrere Fragen:

- Wie sind solche unterschiedlichen Erholungsvorgänge möglich?
- Wie werden mehrere Sprachen im Gehirn organisiert?
- Wie werden sie auf neuronaler Ebene verarbeitet?

Zu den unterschiedlichen Genesungsmustern stellte Pitres die folgenden Thesen auf (Pitres, 1895):

- Die Sprache, die in der Zeit direkt vor dem Schlaganfall am meisten praktiziert worden sei, werde als Erste wiedererlangt.
- Bei der Sprache, die dem Patienten nach dem Aphasie auslösenden Ereignis nicht zur Verfügung stehe, müsse nicht das physiologische Substrat zerstört sein, sondern diese Sprache sei eventuell nur geschwächt.
- Diese Schwächung komme durch eine verstärkte Hemmung zustande, die den Zugriff zu der entsprechenden Sprache erschwere.
- Die einzelnen Sprachen seien nicht mit eigenen Spracharealen im Gehirn repräsentiert.

Die erste dieser Thesen konnte durch mehrere Beobachtungsstudien, die andere Erholungsmuster beschrieben (s.o.) widerlegt werden. Im Hinblick auf die Lokalisation mehrerer Sprachen entwickelte sich hingegen die Theorie, dass eine später erlernte Zweitsprache in der rechten Hemisphäre repräsentiert sein müsse, bzw. die rechte Hemisphäre verstärkt mit einbezogen werde. Bisher durchgeführte Studien weisen aber darauf hin, dass spezifische linguistische Fähigkeiten bei Zweisprachigen in gleichem Maße wie bei Einsprachigen in der linken Hirnhälfte lokalisiert sind. Untersuchungen mit dem Wada-Test und mit der PET zeigten, dass bei Bilingualen Sprachaktivität für beide Sprachen im gleichen Ausmaß in der linken Gehirnhälfte dargestellt werden konnten (Rapport, 1983; Klein, 1999).

Paradis stellte die Behauptung auf, dass Unterschiede zwischen Mono- und Bilingualen nur quantitativ seien und dass es keine linguistischen Funktionen bei Bilingualen gebe, die bei Monolingualen nicht auch zu finden seien. Es brauche somit für den parallelen Gebrauch zweier bzw. mehrerer Sprachen kein spezifisches neuronales Korrelat geben (Paradis, 1998). Weiterhin geht Paradis davon aus, dass die Trennung unterschiedlicher Sprachen durch eine unterschiedlich hohe Erregungs- und Hemmungsschwelle entstehe. Aufbauend auf diesen Ergebnissen, entwickelte sich die Annahme, dass es für die einzelnen Sprachen getrennte neurofunktionelle Systeme gäbe, wobei nicht vorausgesetzt wurde, dass es für die einzelnen Sprachen separate neuroanatomische Gebiete geben müsse.

In von Roux durchgeführten intraoperativen Untersuchungen mit direkter elektrischer Stimulation zeigten sich jedoch neben überlappenden Gebieten für bestimmte Teilfunktionen beider Sprachen Areale, die zu Ausfällen in nur einer Sprache führten. Diese stellten sich im Frontallappen wie auch im temporo-parietalen Cortex dar. Auf

diesen Beobachtungen aufbauend wurde darauf geschlossen, dass es neben Regionen, die in den Verarbeitungsprozess mehrerer Sprachen involviert sind, Areale gibt, die nur für die Verarbeitung einer Sprache verantwortlich sind (Roux, 2002).

Mit PET und fMRT durchgeführte Studien kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen. So wies Kim in einer fMRT-Studie getrennte Areale für die Erst- und Zweitsprache bei spätem Spracherwerb im linken inferioren Frontallappen nach, wohingegen andere fMRT-Studien keine unterschiedliche Lokalisation für die einzelnen Sprachen fanden (Chee, 1999; Illes, 1999). Allerdings wurden in mehreren Studien mit PET und fMRT Unterschiede im Aktivierungsmuster für die einzelnen Sprachen beobachtet, die sich auf die Größe und Stärke der Aktivierung und zusätzlich aktivierten Areale für eine der Sprachen bezogen (Klein et al., 1995; Yetkin et al., 1996; Perani et al., 1996 und 1998; Kim & Ugurbil, 1998). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass es Areale gibt, die nur bei der Verarbeitung einer Sprache aktiviert werden und dass diese mit geeigneten Messmethoden darstellbar sind.

3.1.4.2 Welche Auswirkung hat das Alter bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation?

Wie die Psycholinguistik beschäftigen sich auch zahlreiche bildgebenden Studien mit der Frage der „sensiblen Phase“. Das Alter beim Erwerb einer zweiten Sprache wurde als wichtiger Faktor erkannt und es zeigte sich, dass Personen, die eine zweite Sprache früher und vor einem gewissen Alter erlernen, ein Leistungsniveau für diese Sprache erreichen, dass dem von Muttersprachlern ähnlicher ist als das bei einer später erlernten Zweitsprache (Weber-Fox & Neville, 1996; Yetkin et al., 1996; Perani et al., 1998).

So beschrieben Weber-Fox und Neville in einer ERP-Studie eine verzögerte elektrische Antwort (evoziertes Potential) bei der semantischen Verarbeitung einer erst nach dem elften Lebensjahr erlernten Zweitsprache im Verhältnis zur Muttersprache. In dieser Studie zeigten sie ebenfalls eine Differenz zwischen Muttersprachlern und Zweitsprachlern bei der grammatikalischen Verarbeitung. Diese trat aber schon bei Personen auf, die zu Beginn des Zweitspracherwerbs 1-3 Jahre alt waren und bestand nicht nur in einer Verzögerung des hervorgerufenen Potentials, sondern in einer morphologischen Veränderung sowie einer veränderten Verteilung der entsprechenden Potentiale (Weber-Fox & Neville, 1996). Die Möglichkeit, dass es für die verschiedenen Teilprozesse der Sprache unterschiedliche Zeitabschnitte geben könne, in denen die einzelnen Fähigkeiten optimal erlernt werden,

wurde von mehreren Forschern vermutet. Die sensible Phase für die phonologische Entwicklung (Entwicklung der Rezeption und Produktion von Sprachmelodie) scheint der grammatikalischen Verarbeitung noch voraus zu gehen und in den ersten Lebensmonaten zu liegen (Kuhl, 1992; Flege et al., 1995). Somit können unterschiedliche „sensible Phasen“ für die semantische und die grammatikalische Sprachverarbeitung durch die Veränderungen der Event-Related-Potentials abgeleitet werden.

In weiteren Studien mit der PET und der fMRT zeigten sich keine Differenzen für die durch unterschiedliche Sprachen entstehenden Aktivierungen des Gehirns bei frühem und bei spätem Spracherwerb. So zeigte Chee in einer fMRT-Studie gleiche Aktivierungsmuster für beide Sprachen bei einer Probanden-Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb (nach dem 15.Lebensjahr) und guten Sprachkenntnissen, im Vergleich mit einer Gruppe mit frühem Spracherwerb (vor dem 6.Lebensjahr) (Chee et al., 1999).

Auch die PET-Untersuchung von Perani (Perani et al., 1998) konnte keine Unterschiede zwischen den durch Sprachverarbeitungen aktivierte Areale nachweisen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Alter bei Zweitspracherwerb einen Einfluss auf die kortikale Organisation der Zweitsprache hat.

3.1.4.3 Welche Auswirkung hat das Leistungsniveau einer Zweitsprache auf die kortikale Organisation?

Wie schon weiter oben erläutert, kann eine Sprache, die weniger gut beherrscht wird, durch Mechanismen wie pragmatische Kompetenz und metalinguistisches Wissen ergänzt werden. Beide Fähigkeiten dienen zum Verständnis und zur Kontrolle der Sprache sowie zum Ausgleich der fehlenden spezifischen Sprachkompetenz.

Die Aktivierungen, die besonders bei der Verarbeitung einer nicht gut beherrschten Zweitsprache in der rechten Hirnhälfte auftreten, werden auf eine stärkere Einbeziehung von pragmatischen und paralinguistischen⁵ Aspekten der Sprache zurückgeführt, da im allgemeinen davon ausgegangen wird, dass sich spezifisch linguistische Verarbeitung weitgehend in der linken Hemisphäre abspielt (Paradis, 1995 und 1998).

Yetkin untersuchte mit der fMRT eine mehrsprachige Gruppe von Probanden, die während der Messung zur Wortgenerierung in ihrer Muttersprache, einer fließend gesprochenen

⁵ Paralinguistik: Aspekte der Sprache, die sich auf den lautsprachlichen Ausdruck von Emotion oder anderen Aspekten der interpersonellen Kommunikation bezieht und unabhängig von grammatikalischen Strukturen ist

Zweitsprache und einer nur beschränkt beherrschten Drittsprache aufgefordert worden waren. Die Aktivierung für die dritte, nicht fließend gesprochene Sprache, war signifikant größer als die der beiden anderen Sprachen. Das Aktivierungsmuster der fließend gesprochenen Sprache war größer als die der Muttersprache, der Unterschied war jedoch nicht signifikant (Yetkin et al., 1996). Diese Befunde konnten durch eine Studie von Chee bestätigt werden (Chee et al., 2000). Bei einer Untersuchung von Perani hingegen bedingte die Zweitsprache im Vergleich mit der Erstsprache geringere Aktivierungen, die dem Aktivierungsmuster hervorgerufen durch die akustische Präsentation einer vollkommen fremden Sprache gleich kam (Perani et al., 1996).

Dehaene wies neben einem sehr stabilen Aktivierungsmuster für die Erstsprache bei mehreren Probanden eine deutliche Variabilität für die durch die Zweitsprache hervorgerufenen Aktivierungen nach (Dehaene et al., 1997).

Studien, die sich mit den Auswirkungen des Leistungsniveau auf die kortikale Organisation beschäftigten, zeigten unterschiedliche Ergebnisse, stimmten jedoch alle in der Tatsache überein, dass sich ein geringeres Leistungsniveau auf das Aktivierungsmuster der Zweitsprache auswirkt, und sich dieses von dem der Muttersprache unterscheidet.

4 FRAGESTELLUNG, HYPOTHESEN UND ZIEL DER ARBEIT

4.1 Fragestellung

Alle bisher durchgeführten Studien, die sich mit den hier aufgeführten Fragen zur kortikalen Verarbeitung der Sprachverarbeitung bei Bilingualen beschäftigten, haben die Möglichkeit einer eventuellen unterschiedlichen Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerb sowie des Leistungsniveaus auf die einzelnen Sprachprozesse Grammatik und Semantik zwar in Betracht gezogen, diese jedoch nicht differenziert betrachtet bzw. untersucht.

Eine Ausnahme ist die Studie von Weber-Fox und Neville (1996). Bei dieser wurde mittels ERP der Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Sprachprozesse Grammatik und Semantik separat untersucht. Die Studie konnte zeigen, dass das Alter zur Zeit des Zweitspracherwerbs (vgl. Kapitel 3.1.2) einen deutlichen Einfluss auf die Verarbeitung von Grammatik-Aufgaben hat, jedoch nur eine geringe Auswirkung auf die Semantik-Verarbeitung. Dieser deutliche Unterschied in der neurophysiologischen Antwort bei der Grammatik-Verarbeitung zeigte sich in der Studie von Weber-Fox und Neville bereits bei einer Probandengruppe, die der Zweitsprache ab dem zweiten Lebensjahr ausgesetzt war, wogegen sich Veränderungen bei der Verarbeitung von Semantik erst nach dem 11. Lebensjahr nachweisen ließen (Weber-Fox & Neville, 1996).

Ein unterschiedlicher Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation der Sprachprozesse bei grammatikalischer und semantischer Aufgabenstellung konnte somit auf der neurophysiologischen Ebene nachgewiesen werden. Ob sich das Alter bei Zweitspracherwerb auch auf die kortikale Organisation der an der Grammatik, bzw. Semantik verarbeitenden Gehirnstrukturen auswirkt, ist weiterhin offen.

Auch der Einfluss des Leistungsniveaus auf die kortikale Organisation der Verarbeitung von Semantik und Grammatik wurde in bildgebenden Studien bisher nicht separat untersucht.

Für diese Arbeit ergibt sich aus dem Studium der oben genannten Forschungsarbeiten und den noch offenen Fragen die folgende Fragestellung:

- Welchen Einfluss hat das Alter beim Erlernen einer Zweitsprache auf die kortikale Organisation der Verarbeitung von Grammatik und Semantik?

- Kann eine unterschiedliche Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerbs auf die kortikale Organisation einzelner Sprachprozesse (Grammatik und Semantik) dargestellt werden?
- Welchen Einfluss hat das Leistungsniveau für eine Sprache auf die kortikale Organisation der Verarbeitung von Grammatik und Semantik?
- Kann eine unterschiedliche Auswirkung des Leistungsniveaus für eine Sprache auf die kortikale Organisation der einzelnen Sprachprozesse Grammatik und Semantik dargestellt werden?

4.2 Hypothesen

Auf Grund der Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Zweisprachigkeit in den letzten Jahren (vgl. Kapitel 3.4), ist eine Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation der Sprachverarbeitung zu erwarten (Chee et al., 1999; Perani et al., 1998). Zudem ist von einem unterschiedlichen Effekt des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation der Verarbeitung von Grammatik und Semantik auszugehen (siehe die Studie von Weber-Fox und Neville, 1996).

Es ist weiter davon auszugehen, dass sich eine Auswirkung des Leistungsniveaus auf die kortikale Organisation der Sprachverarbeitung darstellen lässt (Perani et al., 1996; Yetkin et al., 1996; Dehaene et al., 1997; Chee et al., 2000) und dass der Einfluss für die Verarbeitung der Sprachprozesse Grammatik und Semantik unterschiedlich ist.

Die durch die Sprachverarbeitung aktivierten Areale werden sich wie in anderen bildgebenden Studien (Chee et al., 2000; Kim et al., 1999; Perani et al., 1996; u.a.) vor allem im Bereich der typischen Sprachregionen, im linken inferioren Frontallappen und im linken Temporallappen darstellen.

4.3 Zielsetzung

Diese Arbeit soll ein Beitrag zur Grundlagenforschung im Hinblick auf Spracherwerb und die unterschiedlichen Formen des Zweitspracherwerbs sein.

Auf der Grundlage selbst erhobener Daten soll die Auswirkung des Alters bei Spracherwerb sowie des Leistungsniveaus auf die kortikale Organisation der Verarbeitung von Grammatik und Semantik dargestellt werden. Untersucht werden sollen anhand

optischer Satzpräsentation und Aufforderung zur semantischen und grammatikalischen Entscheidung zweisprachige Probanden (Italienisch-Deutsch) mit unterschiedlichem Alter bei Zweitspracherwerb. Weiterhin sollen gleichzeitig zweisprachige Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und unterschiedlichem Leistungsniveau untersucht werden. Auf diese Weise sollen Unterschiede zwischen parallelem und seriellen Zweitspracherwerb aufgezeigt werden. Die Ergebnisse sollen im Vergleich mit vorliegenden Studien aus den Bereichen der Psycholinguistik, der Neurochirurgie und der Neurolinguistik diskutiert und erklärt werden.

5 BIOPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN UND METHODEN

5.1 Methodik der funktionellen Magnetresonanztomographie

5.1.1 Magnetresonanztomographie (MRT)

Das Grundprinzip der Magnetresonanztomographie beruht auf der Tatsache, dass Atomkerne mit ungerader Anzahl von Protonen oder Neutronen einen Eigendrehimpuls besitzen, den so genannten Kernspin. Im menschlichen Körper spielen hierbei fast ausschließlich (99,98%) Wasserstoff-Protonen eine Rolle (Hoppe, 1982). Durch diesen Drehimpuls, mit dem die Kerne dieser Atome um die eigene Achse kreisen, kommt es zu einem das Atom umgebenden Magnetfeld und das Atom erscheint von außen als Dipol. Setzt man die Atomkerne nun dem magnetischen Feld des Kernspintomographen aus, kommt es vorwiegend zur parallelen Ausrichtung der Dipole entlang des äußeren Magnetfelds; sie treten „in Phase“. Durch diese Ausrichtung führen die Kerne zusätzlich zu ihrer Eigenrotation eine Kreiselbewegung um die Richtung des Magnetfelds aus (Präzession). Die Frequenz dieser Präzessionsbewegung wird auch als Larmor- oder Resonanzfrequenz bezeichnet. Wird diese Ausrichtung mit einem senkrecht zum äußeren Magnetfeld gerichteten hochfrequenten Wechselfeldimpuls gestört, kommt es zu einer Auslenkung. Mit Beendigung der Auslenkung kehren die Atomkerne wieder in ihre Ausgangslage zurück und senden dabei ihrerseits eine elektromagnetische Welle aus. Diese nennt man Nukleare Magnetresonanz (NMR). Die Zeit, die die Atomkerne dafür benötigen, bezeichnet man als Relaxationszeit. Dabei sind zwei Vorgänge zu unterscheiden, die longitudinale und die transversale Relaxation. Bei der longitudinalen oder Spin-Gitter-Relaxation kommt es zur Energieabgabe der Spins (Protonen) an die Umgebung (Gitter). Die Zeitkonstante, die zur erneuten Ausrichtung parallel zum äußeren Magnetfeld benötigt wird, nennt man T1. Zur transversalen oder Spin-Spin-Relaxation kommt es durch die Wiedereinstellung der Spins untereinander. Diese Zeit wird T2 genannt. Die Relaxationszeiten können durch bestimmte Puls-Sequenzen einzeln bestimmt werden. Eine getrennte Anregung der einzelnen axialen Schichten kann durch eine lineare Überlagerung des magnetischen Hauptfeldes mit wechselnden Gradienten-Feldern erreicht werden.

Die Erzeugung von tomographischen Schichtbildern geht ebenfalls auf die selektive Bestimmung des Entstehungsortes eines Resonanzsignals zurück. Mit Hilfe von verschiedenen Frequenzen und Phasen ist eine Erstellung von dreidimensionalen Bildern möglich. Mit drei senkrecht zueinander orientierten Elektromagneten (Gradienten-

Magneten) wird für jeden Raumpunkt innerhalb des Tomographen ein anderes Magnetfeld erzeugt. Auf diese Weise entsteht an jedem Punkt eine andere Larmor-Frequenz, so dass ein ausgewählter Raumpunkt durch die Wahl der Frequenz der Hochfrequenzstrahlung selektiv angeregt werden kann. Die gemessenen Frequenzverteilungen werden anhand der so genannten Fourier-Transformation in eine räumliche Signalverarbeitung übertragen.

5.1.1.1 Der BOLD-Effekt (Blood-Oxygenation-Level-Dependent-Effect)

Wie andere funktionellen bildgebenden Verfahren basiert auch das Prinzip der an den BOLD-Effekt gebundenen funktionellen Magnetresonanztomographie darauf, dass die cerebrale vasomotorische Autoregulation zu einer an die Aktivität des Gehirns gebundene lokal vermehrte Durchblutung führt. Die Funktion des Gehirns als Antwort auf einen bestimmten Stimulus ist räumlich beschränkt, so dass diese räumliche Fokussierung durch bildgebende Methoden mittels Messung der Veränderung des lokalen Blutflusses und der metabolischen Änderung dargestellt werden kann. Die hohe räumliche Auflösung des fMRT ist sehr nützlich bei der Darstellung und Lokalisierung von aktivierten Gehirnarealen. Die Kopplung zwischen der neuronalen Tätigkeit und der physiologischen Antwort ist eng und gut lokalisiert, läuft zeitlich allerdings mit einer Verzögerung im Bereich von Sekunden ab.

Der Bold-Kontrast bezieht sich auf die Magnetisierbarkeit, die Suszeptibilität des Hämoglobins, das in deoxygeniertem Zustand ungepaarte Elektronen besitzt und durch diese paramagnetisch ist, also eine andere Suszeptibilität aufweist als das umgebende Gewebe. Durch die unterschiedliche Suszeptibilität zur Umgebung kommt es zu einer lokalen Feldinhomogenität, die zum Signalverlust führt. Oxygeniertes Hämoglobin dagegen wirkt durch das ans Häm gebundene Sauerstoff-Atom diamagnetisch (weist keine magnetischen Eigenschaften auf) und hat etwa dieselbe Suszeptibilität wie das Hirngewebe. Bei der Auswahl einer Mess-Sequenz, die für die an den Oxygenierungsgrad des Blutes Suszeptibilitätsänderungen sensibel ist, können die durch die Änderung der Suszeptibilität entstehenden Signaländerungen dargestellt werden.

Da der BOLD-Kontrast im physiologischen Zustand, vor allem mit den hämodynamischen Veränderungen variiert, wurde er in der bildlichen Darstellung des Gehirns als nützlich erkannt (Ogawa et al., 1990a). Die $T2^*$ -Relaxationszeit des Blutes hängt vom Grad der Deoxygenierung des Blutes ab (Thulborn et al, 1982). Ogawa (1993) beschrieb mit der folgenden Gleichung die Abhängigkeit der $T2^*$ -Zeit von der Höhe der venösen Blutoxygenierung (Ogawa et al., 1993):

$$1/T2^* \propto (1-Y)^\beta CBV$$

Dabei bezeichnet Y den Grad der venösen Blutoxygenierung, CBV das venöse zerebrale Blutvolumen und β wird durch numerische Simulationen auf $1 < \beta < 2$ festgelegt. Der Grad der venösen Blutoxygenierung ist abhängig vom zerebralen Blutfluss (CBF) und von der zerebralen Metabolisierungsrate von Sauerstoff = $CM R_{O_2}$.

Das Ficksche Diffusionsgesetz beschreibt diesen Zusammenhang wie folgt:

$$CM R_{O_2} = [H](1-Y) CBF$$

[H] steht für die Konzentration von Hämoglobin im Blut.

Die Kombination beider Gleichungen ergibt

$$T2^* \propto H^\beta / CBV (CBF / CM R_{O_2})^\beta$$

Mit dieser Gleichung zeigt sich über $T2^*$ die Abhängigkeit des fMRT-Signals von physiologischen Parametern. Diese Darstellungen wurden in neueren Untersuchungen bestätigt (Kim et al., 1997; Schwarzbauer et al., 1999). Letzterer diskutiert zudem die Bedeutung des zerebralen Sauerstoffverbrauches und stellt fest, dass auch schon ein geringer Anstieg des zerebralen Sauerstoffverbrauches unter Stimulationsbedingung zu einer signifikanten Verringerung von $T2^*$ führen kann. Daraus wird deutlich, dass eine Folgerung über die Quantität der neuronalen Aktivierung aufgrund der Höhe des BOLD-Kontrastes nicht gesichert ist. Andere Autoren sprechen sich jedoch für einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen aus (Boynton et al., 1996).

Ein externer Stimulus führt also in der entsprechenden Region zu einer lokalen Erhöhung der neuronalen Aktivität und dadurch zu einem Anstieg der zerebralen Metabolisierungsrate von Sauerstoff (um ca.5%) und Glucose. Es kommt zu einer lokalen Gefäßerweiterung und zur Erhöhung des regionalen zerebralen Blutvolumens (rCBV). Aus der lokalen Gefäßerweiterung und der Erhöhung des regionalen zerebralen Blutvolumens resultiert ein erhöhter regionaler Blutfluss (rCBF).

Obwohl es zu einer verstärkten Ausschöpfung des Sauerstoffes kommt bringt der erhöhte regionale Blutfluss durch eine deutliche Überkompensation einen relativen Abfall des deoxygenierten Hämoglobin im Verhältnis zum oxygenierten Hämoglobin mit sich (= neurovaskuläre Kopplung). Die lokale Erniedrigung des deoxygenierten Hämoglobins führt zur Verringerung der Magnetsuszeptibilität des Magnetfelds und somit zu einem Anstieg der Intensität des MRT-Signals (Fox et al., 1986).

Die Signalerhöhung bei einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla beträgt weniger als 5%. Diese Veränderung ist wesentlich geringer, als nach den Gleichungen 1 und 2 zu erwarten war. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Veränderung von $T2^*$ mit Gleichung 3 nur im Blut vor sich geht. Der Anteil des Blutes im Gehirn beträgt aber nur 5-10%, die Signalerhöhung bezieht sich jedoch auf das gesamte Gewebe und obwohl die Änderung der magnetischen Eigenschaften im Blut auch die $T2^*$ in den umgebenden Geweben beeinflusst, ist die resultierende Signaländerung deutlich geringer.

Zu beachten ist, dass der Anstieg des oxygenierten Hämoglobins in den aktivierten Arealen erst 6-10 Sekunden nach der Aktivierung durch den äußeren Stimulus gemessen werden kann, was in der Signalauswertung von Bedeutung ist und entsprechend angepasst werden muss.

5.1.2 Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

Wie andere funktionelle bildgebende Verfahren beruht auch das Prinzip der Kernspintomographie auf dem Phänomen der „neurovaskulären Kopplung“. Das heißt, es wird der Effekt ausgenutzt, dass es bei einer neuronalen Aktivitätssteigerung in begrenzten kortikalen Gebieten zu einem erhöhten Blutfluss kommt, der den Sauerstoff-Bedarf des Gewebes übersteigt. Diese Areale können anhand des BOLD-Effektes gemessen und neben den anatomischen Strukturen des Hirngewebes dargestellt werden. Eine solche Messung wurde erstmals von Ogawa dargestellt und zwei Jahr später am Menschen erfolgreich durchgeführt (Ogawa et al., 1990b und 1992).

Für die funktionelle Darstellung ist vor allem die Dephasierung der Spins in der XY-Ebene, den transversale Anteil der Magnetisierung, durch auch kleinste Magnetfeld-Inhomogenitäten von Bedeutung. Durch diese kann das veränderte Signal, das durch den verstärkten regionalen Blutfluss entsteht, über den BOLD-Effekt erfasst und dargestellt werden. Durch Anwendung einer Mess-Sequenz, die für diese Signalveränderung (den so genannten $T2^*$ -Effekt) besonders empfindlich ist, wird die aktivierte Gehirnregion mit einem relativ höheren Signal zur Darstellung gebracht.

Eine Bildgebungstechnik, die für die funktionelle Bildgebung sehr gut geeignet ist, ist die echoplanare Bildgebung (Echo Planar Imaging = EPI). Sie macht die Messung eines großen Volumens innerhalb sehr kurzer Zeit möglich (für einzelne Schichten unter 100 Millisekunden). Diese Methode wurde schon in den siebziger Jahren durch Mansfield

(1977) beschrieben, konnte aber erst aufgrund der sehr hohen Anforderung an das Gradientensystem seit kürzerer Zeit für die funktionelle Bildgebung ausgenutzt werden.

Da die funktionelle Darstellung darauf beruht, dass Veränderungen erfasst werden, muss eine Differenzmessung, z.B. Ruhe gegen aktivierten Zustand oder zwei unterschiedliche Stimulationsbedingungen durchgeführt werden. Die separate Aktivierung einer bestimmten Gehirnregion setzt ein geeignetes Stimulationsparadigma voraus. Für die MRT-Untersuchung wird zunächst die Region bestimmt, in der die durch die Aufgabenstellung zu erwartenden Aktivierungen zu erwarten sind. Entsprechend dieses Bereichs legt man die zu messenden Schichten fest. Von diesen Schichten wird dann in zeitlichem Verlauf eine Anzahl von Bildern aufgenommen. Während der Messung wechseln sich Phasen der Aktivierung und Phasen der Ruhe (oder einer anderweitig definierte Bedingung) in genau festgelegter Folge ab.

Da es während der Aktivierungsphasen in den aktiven Gehirnregionen zu einem Signalanstieg kommt, lassen sich mit geeigneten statistischen Methoden Signaldifferenzen bestimmen, die zu einem Aktivierungsbild umgewandelt werden können. In einem aktivierten Kortexareal beträgt der relative Signalanstieg bei einer Feldstärke von 1.5 Tesla nur etwa 2-5% und ist nicht in einem einzelnen Bild nachzuweisen (Huber, 2000). Um eine Information über die Aktivierung zu erhalten, muss diese aus allen Bildern errechnet werden, die während einer bestimmten funktionellen Aufgabe erstellt werden. Dazu wird normalerweise ein statistischer Vergleich zwischen den während der Aufgabe und der Kontroll-Aufgabe akquirierten Bildern durchgeführt. Pixelweise wird der Mittelwert und die Standardabweichung aller Pixel der „Kontroll-Bilder“ und denen der „Aktivierungs“-Bilder berechnet und durch parametrischer (z-score, t-Test) oder nicht-parametrischer (Wilcoxon-Test) Tests auf signifikante Unterschiede untersucht. Durch die Überlagerung von funktionellen Aktivierungsbildern mit anatomischen MRT-Bildern gleicher Schichtführung kann man die Änderungen des BOLD-Signals anatomisch zuordnen.

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Probanden

An der Studie teilgenommen haben 16 gesunde rechtshändige Erwachsene beiderlei Geschlechts im Alter von 22 bis 49 Jahren (mittleres Alter: 26,97). Bei keinem von ihnen war zum Zeitpunkt der Untersuchung eine neurologische oder psychiatrische Krankheit

bekannt. Die Probanden waren Studenten oder hatten ein Studium oder eine vergleichbare Ausbildung abgeschlossen.

Das vorgelegte Test-Material war den Teilnehmern vor dem Experiment nicht bekannt. Die Teilnahme war freiwillig und wurde im Anschluss vergütet. Die Probanden gaben vor der Untersuchung ein schriftliches Einverständnis für die Untersuchung ab. Alle Messungen wurden unter Beachtung der Bestimmungen und Richtlinien des Instituts durchgeführt und waren durch die Ethik-Kommission der Charité bewilligt worden. Die Teilnehmer wohnten zum Zeitpunkt der Studie seit mindestens sechs Monaten in Deutschland und haben alle von Geburt an die italienische Sprache erlernt.

Die Einteilung in die Gruppen erfolgt entsprechend des Alters zu Beginn des Erwerbs der Deutschen Sprache und der Sprachleistung.

Tabelle 1: Probanden

		EAHP	LAHP L1= Italienisch	LALP L1= Italienisch	Gesamt
Anzahl		5	5	6	16
Geschlecht	f	4	3	2	9
	m	1	2	4	7
mittleres Alter		23,8 SD: 1,8	29,6 SD: 11,3*	27,5 SD: 5,2	26,97 SD: 6,1
AoA = Alter zu Beginn des Zweitspracherwerbs		0 SD: 0 (beide Sprachen)	15,6 SD: 9,0*	22,8 SD: 5,5	
Dauer des Zweitsprachgebrauchs (Jahre)		23,8 SD: 1,8 (beide Sprachen)	14,0 SD: 7,6	4,7 SD: 3,7	
Sprachexposition (%) Italienisch	0.-6.LJ	60,0	100	100	
	7.-14.LJ	46,7	90,0	100	
	15.-18.LJ	43,4	80,0	97,2	
	>18.LJ	43,4	46,7	66,7	
Sprachexposition (%) Deutsch	0.-6.LJ	40,0	0	0	
	7.-14.LJ	53,3	10,0	0	
	15.-18.LJ	56,6	20,0	2,8	
	>18.LJ	56,6	53,3	33,3	
Proficiency Level Leistungsniveau L2 (max. 10 Punkte)		9,2 SD: 1,1 (beide Sprachen)	9,4 SD: 0,6 (beide Sprachen)	4,2 SD: 3,1 (Deutsch)*	

EAHP = early acquisition high proficiency

LAHP = late acquisition high proficiency

LALP = late acquisition low proficiency

L1= seit Geburt erworbene Sprache, L2= später erworbene Sprache

AoA = age of acquisition = Alter zu Beginn des Spracherwerbs (LJ = Lebensjahr)

Sprachexposition der Erst- und Zweitsprache = Intensität mit der der Proband in den im Fragebogen aufgeführten Zeitspannen (0-6 Jahre, 7-14 Jahre, 15-18 Jahre und älter als 18 Jahre) der jeweiligen Sprache ausgesetzt war. Diese wurde von den Probanden selber angegeben.

PL= proficiency level = Leistungsniveau; wurde durch einen kurzen Sprachtest festgelegt:

die Probanden erhielten jeweils einen kurzen Zeitungsartikel in der Erst- und in der Zweitsprache. Diese sollten sie lesen, um dann zu jedem Text fünf Fragen in schriftlicher Form zu beantworten. Für jede richtige Antwort gab es einen Punkt (maximal 10 Punkte).

SD = Standard Deviation = Standardabweichung

* Auf den Sprachtest in der Erstsprache für Probanden mit spätem Zweitspracherwerb wurde verzichtet.

In der erste Gruppe (EAHP) waren die Probanden ab der Geburt mit beiden Sprachen konfrontiert worden. Drei von fünf hatten eine deutsche Mutter und einen italienischen Vater, wobei sie mindestens die ersten vier Jahre in Italien gelebt haben, zwei hatten eine italienische Mutter und einen italienischen Vater und sind in Deutschland aufgewachsen. Drei von Ihnen gaben Italienisch als ihre Erstsprache an, zwei Deutsch.

Der zweiten Gruppe (LAHP) wurden 5 Probanden zugeteilt, die Deutsch nicht vor dem 7. Lebensjahr erlernt hatten. Alle Probanden sprachen Deutsch seit mindestens 7 Jahren und hatten sehr gute Sprachkenntnisse.

In der dritten Gruppe (LALP) waren 6 Probanden, die Deutsch nicht vor dem 14. Lebensjahr erlernt hatten und mäßige Sprachkenntnisse für die deutsche Sprache aufwiesen. Die Probanden sprachen Deutsch seit mindestens einem Jahr, maximal seit 7 Jahren.

Alle Probanden wohnten zur Zeit der Untersuchung seit mindestens einem halben Jahr in Deutschland.

5.2.2 Versuchsaufbau

5.2.2.1 Aktivierungsmaterial

Das Aktivierungsmaterial bestand aus 180 kurzen Sätzen, 90 auf Deutsch, 90 auf Italienisch. Jeweils 44 der deutschen bzw. italienischen Sätze waren semantisch bzw. pragmatisch oder grammatikalisch korrekt. 23 Sätze in jeder Sprache waren semantisch bzw. pragmatisch verändert aber grammatikalisch richtig und dementsprechend waren 23 Sätze in jeder Sprache grammatikalisch verändert und semantisch /pragmatisch richtig.

Die inhaltlichen Veränderungen bestanden aus Unverträglichkeiten des Objekts zum Satz (La formica sorleva l'elefante. = Die Ameise hebt den Elefanten.) oder pragmatischen Unverträglichkeiten, einer Unverträglichkeit mit dem Weltverständnis (Der Bach fließt den Berg hinauf).

Grammatikalische Veränderungen bezogen sich auf den Numerus (Einzahl/Mehrzahl) (Il sole [singular] sorgono [plural] ogni mattina.), den Genus (Die [feminin] Theater [Neutrum] ist in der Stadtmitte.) oder den Kasus (Die Studentin kauft das [Akkusativ] teuren [Dativ]Buch) (nur in der deutschen Sprache).

Die hier verwendeten grammatikalischen Veränderungen des Numerus, des Genus oder des Kasus sind in der italienischen wie in der deutschen Sprachen deutlich durch den Artikel, das Nomen oder das Adjektiv erkennbar.

Alle Sätze waren orthographisch korrekt. Um visuelle und kognitive Unterschiede so gut wie möglich zu verhindern, waren die Sätze näherungsweise gleich lang und enthielten im Durchschnitt 6,4 Worte (4 bis 8 Worte).

5.2.2.2 Darbietung des Satzmaterials

Das Satzmaterial und das dazwischen eingeblendete Fixationskreuz (schwarz auf weißem Hintergrund) wurden mit dem Softwarepaket LabView® präsentiert und mittels eines LCD-Videoprojektor (NEC Multisync 8000 G) auf eine Rückprojektionsmattscheibe (Dalite, Duplex), die senkrecht auf der Kopfspule befestigt war, projiziert. Ein Spiegel (bedampftes Plastik), der in einem Winkel von 45° ebenfalls auf der Kopfspule befestigt wurde, ermöglichte es der Versuchsperson, das auf die Mattscheibe projizierte Satzmaterial zu lesen. Der LCD-Videoprojektor wurde einige Meter vor dem Kernspintomographen aufgebaut. Um die Projektion des gesamten Monitorbildes auf die Mattscheibe möglich zu machen, war die Optik des Projektors entfernt und durch ein externes Linsensystem ersetzt worden.

Die Sätze waren für jede Bedingung pseudo-randomisiert und in 12 Blöcke eingeteilt (3 Einheiten, in denen jede Bedingung jeweils einmal vertreten war). Ein Block dauerte 128 Sekunden und es folgte einer Pause von 32 Sekunden. In dieser Zeit wurde ein Fixationskreuz in der Mitte des Sichtfeldes präsentiert. Jeder Block bestand aus einem erklärenden Einführungssatz (z.B. „INHALT DEUTSCH“) und 15 richtigen, bzw. veränderten Sätzen. Der Satz wurde jeweils für 4 Sekunden gezeigt und von einem 4 Sekunden Intervall (Antwortzeit) gefolgt, in dem ebenfalls das Fixationskreuz dargeboten wurde.

Die Präsentationsphase startete nach einer Ruhezeit von einer Minute.

5.2.2.3 Aufgabenstellung

Die Probanden wurden vor der Messung mittels eines kurzen Testlaufs mit der Aufgabenstellung vertraut gemacht. Sie wurden dazu aufgefordert, sich während der Messung möglichst wenig zu bewegen und die ihnen präsentierten Sätze lautlos zu lesen. Dann sollten sie entscheiden, ob der dargebotene Satz, entsprechend der vor jedem Testblock festgelegten Aufgabenstellung, entweder semantisch/pragmatisch oder grammatikalisch richtig oder falsch ist. Der als richtig identifizierte Satz musste per Mausklick in der auf den Satz folgenden Pause (Präsentation eines Fixationskreuzes) mit der rechten Hand bestätigen werden.

Auf diese Weise wurde die Aufmerksamkeit der Probanden erhalten und die Genauigkeit der Antworten gemessen. Die Reaktionsgeschwindigkeit wurde nicht gemessen.

Insgesamt dauerte eine komplette Messung (anatomische und funktionelle Messungen) etwa 90-120 Minuten zuzüglich der Zeit für den Sprachtest und der vorherigen Instruktionen.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Messung wurde der Proband durch ein kurzes Gespräch und mittels dem in der klinischen Radiologie üblichen Bogen zur Patientenaufklärung über die Risiken und Kontraindikationen der kernspintomographischen Untersuchung aufgeklärt. Die Messungen wurden mit einem Siemens Magnetom Vision mit einer Magnetfeldstärke von 1.5 Tesla durchgeführt. Die Versuchsperson legte sich auf die zum Kernspintomographen (Siemens, Erlangen, Deutschland, Typ Vision 1,5 Tesla) gehörige Liege und ihr Kopf wurde in der Kopfspule positioniert. Ein Vakuumkissen diente zur Stabilisierung. Nach dem Einfahren des Probanden in die Röhre wurde die Mattscheibe an der Kopfspule befestigt und der Spiegel so eingestellt, dass diese für den Probanden vollständig sichtbar war. Mit Hilfe des Linsensystems wurde die Mattscheibe fokussiert und das Fixationskreuz auf die Mitte des Gesichtsfelds der Versuchsperson eingestellt.

Die Aufnahme begann mit einer ersten Einstellungsmessung („Scout“), bei welcher drei anatomische Bilder in sagitaler, koronarer und transversaler Richtung des Kopfes gewonnen wurden, um die genaue Positionierung der Schichten der nächsten Sequenzen zu ermöglichen.

Es folgte eine T1 gewichtete Messung zur dreidimensionalen Darstellung der anatomischen Strukturen, eine so genannte MP-RAGE (Magnetized Prepared Rapidly

Aquired Gradient Echo) mit den Einstellungen: TR (Wiederholungszeit) 9,7 ms; TE (Echozeit) 4,0 ms; flip angle (Kippwinkel des Anregungsimpulses) 12°, voxel size 1 mm³ (Auflösung).

Die Schichten für die anschließenden Messungen wurden anhand der Scoutbilder parallel zu einer gedachten Linie zwischen anteriorer und posteriorer Kommissur (AC-PC-plans) angelegt.

Als erstes wurde eine zweidimensionale T1 gewichtete Messung mit 16 transversalen Schichten in der oben genannten Ausrichtung durchgeführt (TR 784 ms; TE 14,0; flip-Winkel 70°; field of view (Sichtfeld) 256 mm x 256 mm; Matrix 256 x 256 pixel (Bildpunkte); 16 Schichten; Schichtdicke 5 mm; Abstand zwischen den Schichten 0,5 mm); Dauer 12 Minuten.

Anschliessend folgte die funktionelle Messung. Dazu wurden 960 funktionelle Bildserien (Scans) mit T2* gewichteten Bildern vom gesamten Gehirn in 16 transversalen Schichten in der gleichen Ausrichtung mit einer so genannten EPI-Mosaik-Sequenz (EPI = Echo Planar Imaging) aufgenommen (TR 2000 ms; TE 60 ms; flip-Winkel 90°; field of view 256 mm x 256 mm; matrix 64 x 64; 16 Schichten; Schichtdicke 5 mm; Schichtabstand 0,5 mm; aufsteigende Anregungsabfolge).

Die aufgenommenen Schichten umfassten das ganze Gehirn mit Ausnahme des untersten Teiles des Planum polare, des Cerebellums, und des obersten Abschnitts des frontalen sowie des parietalen Lappens.

5.2.4 Datenanalyse

Die gesamten Daten sind mit dem Programm Brain Voyager® 2000 (Goebel et al., 1998) verarbeitet und analysiert worden.

Zur Auswertung der Daten wurden zunächst die anatomischen Bilder der MP-RAGE für alle Probanden gemäß dem Atlas von (Talairach & Tournoux) standardisiert. Dazu wurden die Daten in der AC-PC Ebene rotiert, manuell die Grenzpunkte (anterior, posterior, superior, inferior sowie die beiden lateralen Grenzpunkte) des Gehirns festgelegt und anschließend automatisch in den Talairach-Raum transformiert (Ashburner & Friston; in Frackowiak et al., 1997; Friston & Ashburner et al., 1995).

Die ersten 15 Scans der funktionellen Messung wurden als so genannte Dummies verworfen und nicht in die Berechnung des allgemeinen linearen Modells mit einbezogen,

um so eine magnetische Aufsättigung zu ermöglichen, da das Magnetfeld während der ersten Aufnahmen noch nicht im Gleichgewicht ist.

Die zwei-dimensionalen funktionellen Bilder (EPI-Sequenzen) wurden an den dreidimensionalen anatomischen Datensatz (MP-RAGE) angepasst und mit Hilfe der Transformationsparameter der anatomischen Normalisierung ebenfalls in den Standardraum überführt. Bei dieser Transformation wurden durch trilineare Interpolation dreidimensionale funktionelle Zeitreihen mit Isovoxel von 1 mm³ Größe berechnet. Die Interpolation erlaubte eine präzisere Bewegungskorrektur des funktionellen Datensatzes.

Es folgte eine Bewegungskorrektur, da auch schon kleinste Kopfbewegungen im Millimeterbereich die Ergebnisse beeinflussen können.

Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wurden die Daten mittels eines Gaussian Kernels (FWHM [Full Width at Half Maximum = Spannweite] 4/3 voxel/scan volumes, angegeben in Millimetern) zeitlich geglättet. Auf eine räumliche Glättung wurde verzichtet, um auch geringe räumliche Veränderungen zu erfassen.

Um die relativ geringen Signalunterschiede zwischen einzelnen Bedingungen beurteilen zu können, wurden die ermittelten Daten statistisch ausgewertet. Der erwartete Signalverlauf in einer aktiven Region entspricht einer Rechteckfunktion (box-car). Da die hämodynamische Antwort auf die neuronale Aktivierung mit einer Latenzzeit von einigen Sekunden einsetzt, „hinkt“ das gemessene Signal dem experimentellen Design hinterher. Die Rechteckfunktion wurde entsprechend an die hämodynamische Antwort angepasst.

Nach der z-Transformation (zur Normalisierung der individuellen Anteile in Gruppen-Daten) wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Dazu diente das allgemeine lineare Modell (GLM). Als abhängige Variablen gingen die Zeitreihen, als unabhängige Variablen, bzw. Prädiktoren die vier experimentellen Bedingungen ein.

Zuerst wurden die Aktivierungen bei den unterschiedlichen Konditionen gegen Ruhe (Fixationskreuz) untersucht. Anschließend wurden die Bedingungen miteinander verglichen und die mehr bzw. selektiv für eine Bedingung aktivierten Areale dargestellt.

Das Signifikanzniveau der funktionellen, gemittelten Gruppendaten wurde für die einzelnen Bedingungen gegen Ruhe sowie für die Aktivierungen im direkten Vergleich einzelner Bedingungen gegeneinander auf $R > 0.22$, $F = 234.88$ entsprechend $p < 0.001$ eingestellt. Dieses Signifikanzniveau wurde auch in vorhergehenden Studien als Signifikanzschwelle verwendet (z.B. Rodriguez-Formells A, 2002). Nur bei der LALP-

Gruppe wurde für die Abbildungen der einzelnen Bedingungen gegen Ruhe ein Signifikanzniveau von $R > 0.2$ gewählt.

Als kleinste signifikante Einheit von aktivierten Pixeln wurde eine Clustergröße von 88 (4x4x5.5) gewählt.

5.2.5 Darstellung der Ergebnisse

Dargestellt im Ergebnisteil werden die Größe der einzelnen aktivierten Areale durch die Anzahl der zusammenhängend aktivierten Voxel sowie die Koordinaten der aktivsten Voxel dieser Aktivierungen. Diese Größen wurden für die einzelnen Bedingungen gegeneinander verglichen.

Zur Abbildung der Aktivierungen wurde mit dem 3D-Flash-Datensatz in einem halbautomatischen Verfahren mit der Brainvoyager-Software ein dreidimensionales Referenzmodell der Kortexoberfläche erstellt, das durch vielfache Glättung entfaltet wurde. Die Aktivierungen (BOLD-Signal-Änderungen), die durch die Verarbeitung des Satzmaterials hervorgerufen wurden, wurden auf dieses dreidimensionale Gehirnmodell mit glatter Oberfläche projiziert.

5.2.6 Anmerkung zu den Daten

Die Daten dieser Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit Isabell Wartenburger erhoben. Neben dieser Arbeit fanden die hier vorgestellten Daten vollständig oder teilweise Eingang in die Veröffentlichungen:

- Wartenburger, I., Wagelaar, I., Heekeren H.R., Abutalebi, J., Perani, D., Cappa, S. & Villringer, A. (2001). Grammatical and semantic judgment in early and late bilinguals – an fMRI-study. *J Cogn Neurosci Suppl.* March, p.131
- Wartenburger, I., Burchert, F., Heekeren H.R., Wagelaar, I., DeBleser, R & Villringer A. (2001). Grammaticality judgments on sentences with and without movement of phrasal constituents – an event-related fMRI-study. *Neuroimage* 13, &: S622

sowie die 2003 von Isabell Wartenburger veröffentlichte Dissertation und Studie: „Early Setting of Grammatical Processing in the bilingual Brain“ von Wartenburger I, Heekeren H, Abutalebi J, Cappa S, Villringer A & Perani D in *Neuron*, Vol.37, January 9, 2003.

6 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse umfassen Daten zur Verarbeitung von grammatikalischem und semantischem Satzmaterial in Italienisch und Deutsch für die drei im Methodenteil (8.1) aufgeführten Probanden-Gruppen. Die Daten sind nach den Probanden-Gruppen geordnet. So werden erst die Daten der Probanden-Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau, dann die der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau und als letztes die der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Leistungsniveau vorgestellt.

In jedem jeweils einer Probanden-Gruppe gewidmeten Abschnitt werden erst die Aktivierungen der einzelnen Konditionen gegen Ruhe und dann im direkten Vergleich dargestellt. Die Ergebnisse, die durch die Grammatik-Konditionen hervorgerufen werden, werden jeweils zuerst aufgeführt, gefolgt durch die Ergebnisse, die bei der Verarbeitung des Semantik-Materials auftreten. Die durch die Verarbeitung italienischen Satzmaterials hervorgerufenen Aktivierungen werden immer als Erstes, die durch deutsches Satzmaterial hervorgerufenen Aktivierungen als Zweites aufgeführt.

6.1 Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau (EAHP)

6.1.1 Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (EAHP)

Bei den Probanden der Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau kam es durch die Verarbeitung des Satzmaterials in beiden Sprachen zu Aktivierungen in den klassischen Spracharealen im linken Temporallappen (BA 21/22) und im inferioren frontalen Gyrus des linken Frontallappens (BA 44/45).

Bei der Verarbeitung **italienischen** Satzmaterials kam es weiterhin bei der Grammatik- und bei der Semantik-Aufgabe zur bilateralen Aktivierung des Gyrus fusiformis (BA 37) und des linken Gyrus precentralis (BA 6).

Bei der Verarbeitung von **deutschem** Satzmaterial fanden sich neben den Aktivierungen in den klassischen Spracharealen aktivierte Areale in der linken anterioren Insel (BA 13) und im supplementär-motorischen Areal (SMA/ BA 6).

Neben den Aktivierungen, die durch die Verarbeitung beider Konditionen hervorgerufen wurden, zeigten sich aktivierte Areale, die nur durch die Verarbeitung einer Kondition (Grammatik oder Semantik) hervorgerufen wurden.

6.1.1.1 Grammatik

Durch die Verarbeitung von **italienischem** Grammatikmaterial wurde zusätzlich zu den bei beiden Konditionen aktivierten Arealen der linke Gyrus angularis (BA 39) aktiviert.

Bei der Verarbeitung der **deutschen** Grammatik-Aufgaben kam es neben den durch beide Konditionen aktivierten Arealen zu einer separaten Aktivierung im linken inferioren Frontallappen (BA 46).

Die Aktivierungen, die durch die Verarbeitung des italienischen und des deutschen Grammatikmaterials hervorgerufen wurden, werden in der hier aufgeführten Tabelle (Tabelle 2) nebeneinander aufgeführt und in der folgenden Abbildung (Abbildung 1) bildliche dargestellt.

Tabelle 2:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe im Vergleich der Grammatik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Grammatik Italienisch		Grammatik Deutsch		Gehirnstruktur
BA 21/22	L	-49,-22,-4	193	-52,-22,-3	102	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-47,18,14*	789			inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 45	L	***		-46,22,7	876	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46	L	-45,38,9	97			inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6		0,11,53	98			superior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	-39,0,30	246	-44,1,35	556	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 37	L	-37,-48,-18	1048	-39,-48,-20	1311	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 39	L			-25,-61,-26	129	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 10	L	-37,41,4	100			mittlere frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 47	L	-41,31,0	185			inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale, in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatik-Kondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

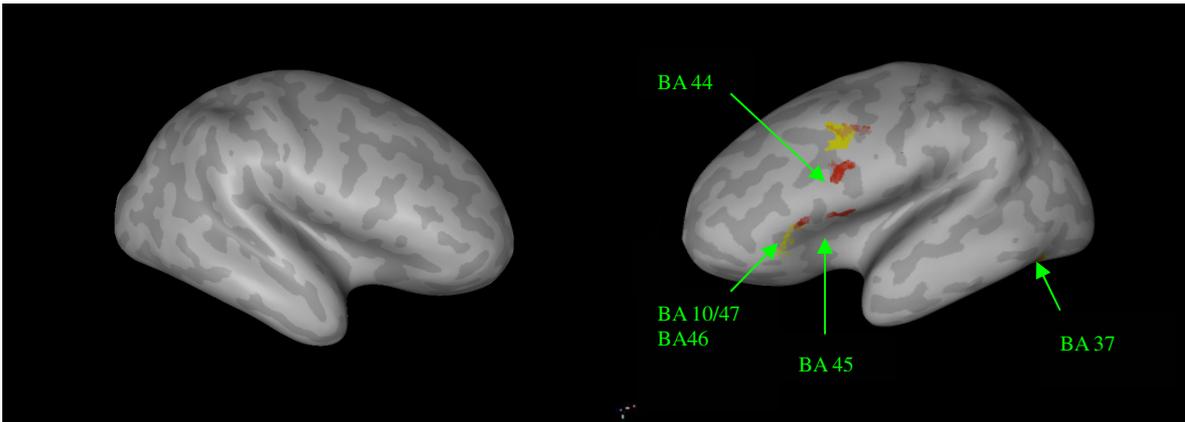


Abbildung 2:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe, die durch die Grammatikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Grammatik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Grammatik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.1.1.2 Semantik

Bei der Verarbeitung des **italienischen** Semantikmaterials stellten sich für die EAHP-Gruppe im Vergleich gegen Ruhe neben den für beide Konditionen aktivierten Arealen Aktivierungen im linken inferioren Frontallappen (BA 44 und 46) und in Regionen des linken inferioren (BA 47) und mittleren frontalen Gyrus (BA 10) sowie im supplementär-motorischen Areal (SMA/ BA 6) dar, vgl. Tabelle 3 und Abbildung 3.

Bei der **deutschen** Semantik-Aufgabe kam es neben den durch beide Konditionen aktivierten Arealen zu weiteren Aktivierung im linken inferior-frontalen Gyrus (BA 45) und im rechten Gyrus precentralis (BA 6). Weiter zeigten sich Aktivierungen im linken inferioren und mittleren frontalen Gyrus (BA 47 und 9), im rechten Parietallappen (BA 7) und im Gyrus fusiformis bilateral (BA 37), vgl. Tabelle 3 und Abbildung 3.

Tabelle 3:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe im Vergleich der Semantik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Gehirnstruktur
BA 21/22	L	-49,-22,-4	193	-54,-50,8 -56,-4,-2	324 106	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-47,18,14*	789	***		superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 45	L	***		*** -50,23,19	735	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46		-45,38,9	97	***		inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6		0,11,53	98	0,-1,49	856	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	-39,0,30	246	-46,4,34	1363	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R			28,-10,48 45,3,35	176 155	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L			*** -38,21,7*	1619	Anteriore Insel
BA 37	L	-37,-48,-18	1048	-42,-47,-19*	3552	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 37	R			17,-72,-8	6061	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 7	R			28,-57,30	531	Lobulus parietale superior/ Parietallappen
BA 9	L			-36,39,32	139	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	L	-37,41,4	100			mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 47	L	-41,31,0	185	-34,19,-13	162	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale, in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Arealen mit ein.

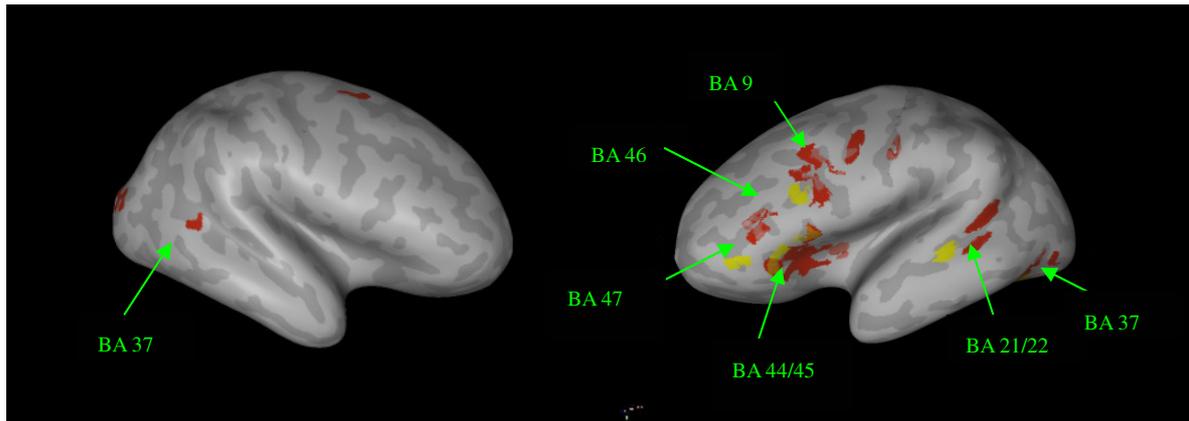


Abbildung 3:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe, die durch die Semantikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Semantik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Semantik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.1.2 Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (EAHP)

Bei dem direkten Vergleich der beiden Sprachen wurden die Aktivierungen, mit denen die Verarbeitung der einen Sprache einherging, statistisch mit denen, die durch die Verarbeitung der anderen Sprache hervorgerufen wurden, verglichen.

Auf diese Weise ist es möglich, aktivierte Areale darzustellen, die separat oder signifikant stärker bei der einen Sprache im Vergleich zu der anderen Sprache aktiviert wurden.

6.1.2.1 Grammatik

Im direkten Vergleich der Grammatik-Konditionen zeigten sich keine separat oder stärker aktivierten Gebiete für die Grammatik-Verarbeitung in einer der beiden Sprachen.⁶

6.1.2.2 Semantik

Es zeigte sich, dass im direkten Vergleich der Sprachen (Italienisch-Deutsch) bei der Verarbeitung **italienischer** Semantik separat oder stärker aktivierte Regionen im linken Temporallappen (21/22) und im linken inferior frontalen Gyrus (44 und 47) zu finden waren, vgl. Tabelle 4.

⁶ Da beim Vergleich der Grammatik-Konditionen miteinander keine Aktivierungen darstellbar waren, soll auf eine Abbildung verzichtet werden.

Tabelle 4:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe im direkten Vergleich der Semantikbedingungen (Italienisch gegen Deutsch und Deutsch gegen Italienisch)

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Brodmann-Areal
BA 21/22	L	-48,-22,-4	113	-52,-51,6	154	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-47,18,9	89			
BA 45	L			-36,21,8*	851	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6				1,-2,49	548	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L			-50,0,40	161	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R			28,-10,49 44,3,35	135 99	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L			***		Anteriore Insel
BA 37	L			-43,-47,-19	1970	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 37	R			38,-55,-22	375	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 7	R			27,-56,30	283	
BA 9	L			-48,12,31 -36,39,32	376 138	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 47	L	-40,32,-2	101	-34,19,-13	148	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikbedingung werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Arealen mit ein.

Das Aktivierungsmuster, das durch das italienische Semantikmaterial im direkten Vergleich hervorgerufen wurde, wird in der Abbildung 4 dargestellt.

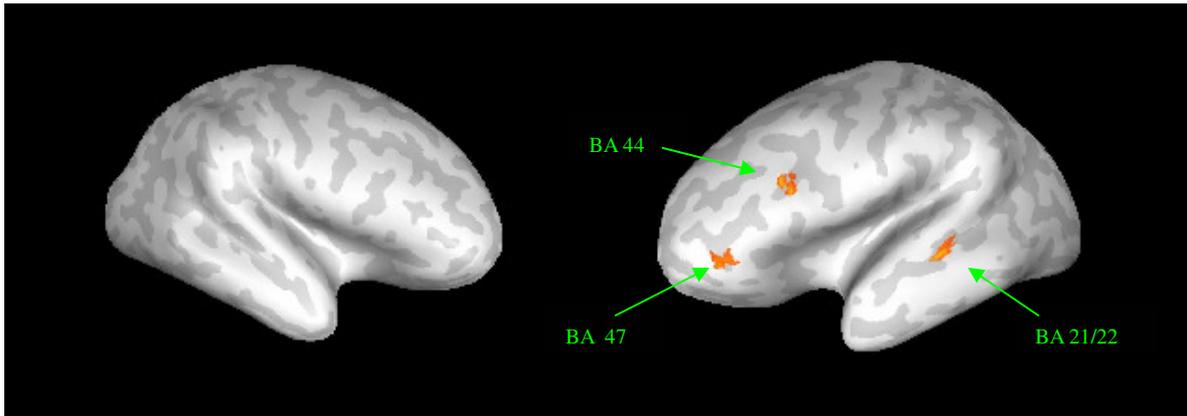


Abbildung 4:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Italienisch gegen Deutsch) durch das italienische Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

Weiter kam es bei der Verarbeitung der **deutschen** Semantik-Aufgaben im direkten Vergleich zu Aktivierungen im supplementär-motorischen Areal (SMA/ BA 6), im Gyrus precentralis bilateral (BA 6) und in der linken anterioren Insel (BA 13) sowie im Gyrus fusiformis (BA 37) beidseits und im rechten superioren Parietallappen (BA 7), vgl. Tabelle 4 und Abbildung 5.

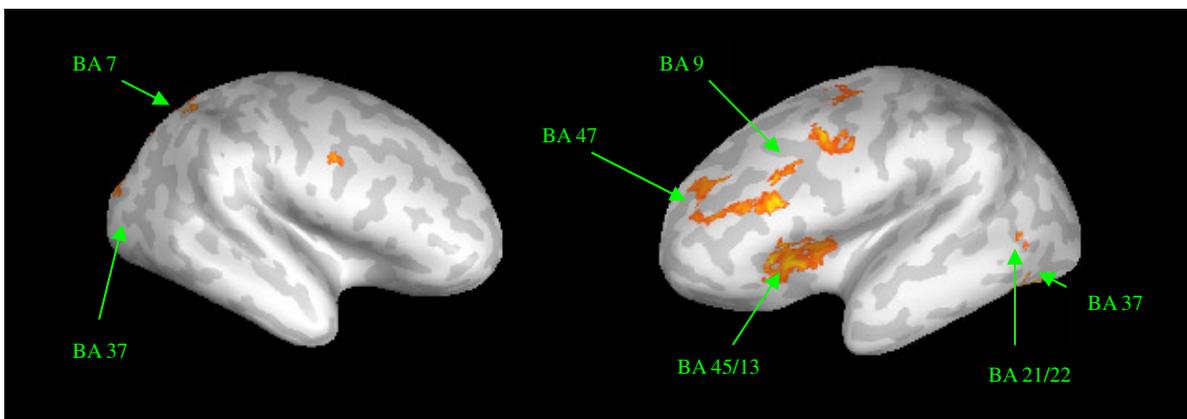


Abbildung 5:

Darstellung der Aktivierungen der EAHP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Deutsch gegen Italienisch) durch das deutsche Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.1.2.3 Zusammenfassung

Im Vergleich der Aktivierungen, hervorgerufen durch die einzelnen Bedingungen beider Sprachen gegen Ruhe, zeigten sich Aktivierungen in den bekannten Spracharealen.

Im direkten Vergleich der Aktivierungen der einzelnen Konditionen zeigten sich bei der Verarbeitung der Semantikaufgaben für beide Sprachen Aktivierungen im linken Frontal- und Temporallappen. Durch die Verarbeitung des grammatikalischen Satzmaterials wurden keine separat oder verstärkt aktivierten Areale für nur eine Sprache hervorgerufen.

Bei der Verarbeitung des deutschen Semantik-Materials wurden mehr Aktivierungen hervorgerufen als durch die italienischen Semantik-Aufgaben.

6.2 Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau (LAHP)

Wie bei der Darstellung der Daten für die Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau werden erst die Aktivierungsmuster der einzelnen Konditionen gegen Ruhe und dann im direkten Vergleich dargestellt. Im jeweiligen Abschnitt werden erst die Aktivierungen durch die Verarbeitung von Grammatik-Material, dann von Semantik-Material aufgeführt.

6.2.1 Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (LAHP)

Durch die Aktivierung mit **italienischem** Satzmaterial im Vergleich zu Ruhe kam es zu folgendem Aktivierungsmuster: Bei beiden Verarbeitungsprozessen (grammatikalisch und semantisch) wurden Areale im linken Temporallappen (BA 21/22) und im linken inferior frontalen Gyrus (BA 44 und 45) aktiviert. Ebenso wurden durch beide Konditionen das supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6), der linke Gyrus precentralis (BA 6) sowie der linke Parietallappen (BA 40) und der linke mittlere frontale Gyrus (BA 9) aktiviert.

Bei der Aktivierung mit **deutschem** Satzmaterial stellte sich ein insgesamt größeres und stärkeres Aktivierungsmuster dar als bei der Aktivierung mit italienischem Satzmaterial (Erstsprache). Aktivierungen im linken Temporallappen (BA 21/22) traten bei der Semantik- wie bei der Grammatik-Kondition auf. Ebenfalls bei beiden Konditionen fand sich ein großes aktiviertes Gebiet im linken inferioren Frontallappen (BA 44, 45, 46 und 13), im linken Parietallappen (BA 40), im linken Gyrus fusiformis (BA 37) und in der

rechten anterioren Insel (BA 13) sowie bilateral im supplementär-motorischen Areal (SMA /BA 6) und im Gyrus precentralis (BA 6).

6.2.1.1 Grammatik

Die **italienische** Grammatik-Bedingung verglichen mit Ruhe rief eine zusätzliche Aktivierung im Bereich des rechten Frontallappens (BA 10) hervor, vgl. Tabelle 5 und Abbildung 5.

Durch die **deutsche** Grammatik-Aufgabe wurden zusätzliche Gebiete auch im linken Frontallappen (BA 9), im linken Parietallappen (BA 39 und 9), im rechten Temporallappen (BA 21/22) und im rechten Frontallappen (BA 46 und 49) aktiviert, vgl. Tabelle 5 und Abbildung 6.

Tabelle 5:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe im Vergleich der Grammatik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Grammatik Italienisch		Grammatik Deutsch		Brodmann-Areal
BA 21/22	L	-54,-48,2	174	-51,-31,0	551	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 21/22	R			49,8,0	164	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-48,6,16	353	-44,7,2*	8678	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 45	L	-49,-14,1	411	-43,19,3	345	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46	L			-42,22,24	348	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46	R			***		
SMA, BA 6		4,0,47	169	2,2,47 -6,-7,54	1020 265	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	-44,-5,38	410	*** -29,-11,52	349	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L			***		Anteriore Insel
BA 13	R			30,17,6 38,9,1	482 110	Anteriore Insel
BA 37	L			-46,-58,-7 -45,-42,-16	3226 211	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 36	R	36,-21,-17	91			Gyrus parahippocampalis/ Temporallappen
BA 39	L			-30,-58,36	1569	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 40	L	-33,-54,39 -51,-32,41	1500 146	-38,-46,32 -50,-34,37 -52,-47,25	626 556 187	Gyrus supramarginalis
BA 9	L	-44,5,28	405	*** -39,44,1	115	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	R	40,4,27	585	39,7,28	2979	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	R	14,37,1	396			mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 47	L	-54,-48,2	174			inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

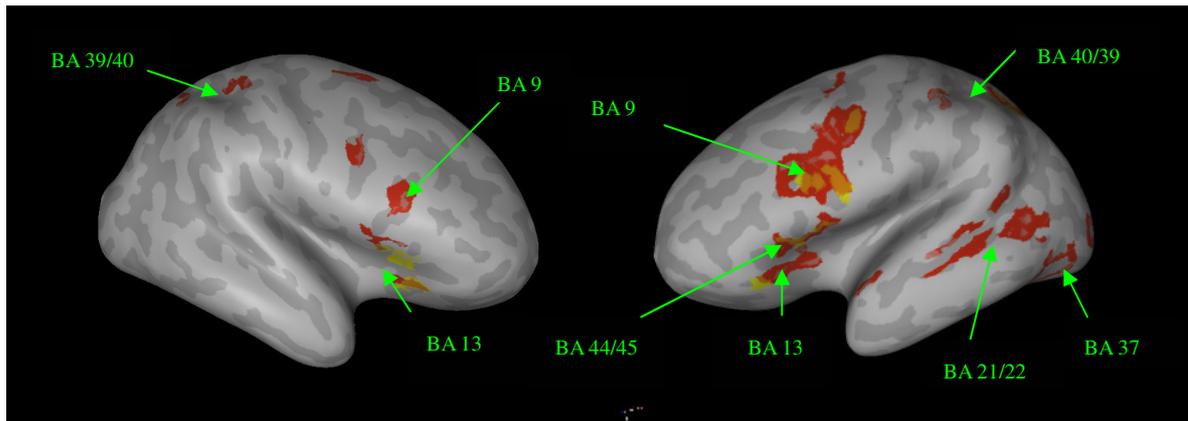


Abbildung 6:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe, die durch die Grammatikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Grammatik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Grammatik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.2.1.2 Semantik

Bei der Verarbeitung der **italienischen** Semantik-Aufgabe zeigten sich weitere aktivierte Areale im rechten Temporallappen (BA 21 und 22), im linken Gyrus fusiformis (BA 37), im rechten Brodmann-Areal 36, in der linken und der rechten anterioren Insel (BA 13) sowie im rechten precentralen Gyrus (BA 6). Zudem fanden sich weitere Aktivierungen im linken Frontallappen (BA 10 und 47).

Durch die Verarbeitung der **deutschen** Semantik-Aufgaben zeigten sich im Vergleich gegen Ruhe weitere Aktivierungen im linken superioren Parietallappen (BA 7), im rechten precentralen Gyrus (BA 6), im rechten Parietallappen (BA 39) und im rechten Frontallappen (BA 10), vgl. Tabelle 6 und Abbildung 7.

Tabelle 6:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe im Vergleich der Semantik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Gehirnstruktur
BA 21/22	L	-56,-29,-1 -52,-48,3	1156 502	-54,-47,4	293	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 21/22	R	45,-25,-6 44,-39,2	367 142			superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-50,1,19 -51,13,15	159 146	-44,6,22*	4462	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 45	L	-48,21,10	98	-45,17,5	559	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46	L			-49,31,13	185	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 46	R					inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, BA6		3,0,47	169	0,-1,48 -3,9,47	1106 365	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	-38,0,32	549	***		Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R	38,2,29	257	38,8,30	1238	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L	-33,18,7	412	***		Anteriore Insel
BA 13	R	35,15,2	302	31,17,8 39,15,18	569 91	Anteriore Insel
BA 37	L	-47,-56,-16	150	-41,-64,-11	1807	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 36	R	36,-21,-17	91			
BA 39	L					Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 39	R			28,-53,38	150	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 40	L	-34,-39,35	141	-48,-34,36	133	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 40	R					Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 7	L			34,-59,46	390	Lobulus superior parietale/ Parietallappen
BA 9	L	-48,10,30	162	***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	R					mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	R	-34,38,0	224	17,43,4	669	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 47	L	-45,20,2	241			

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

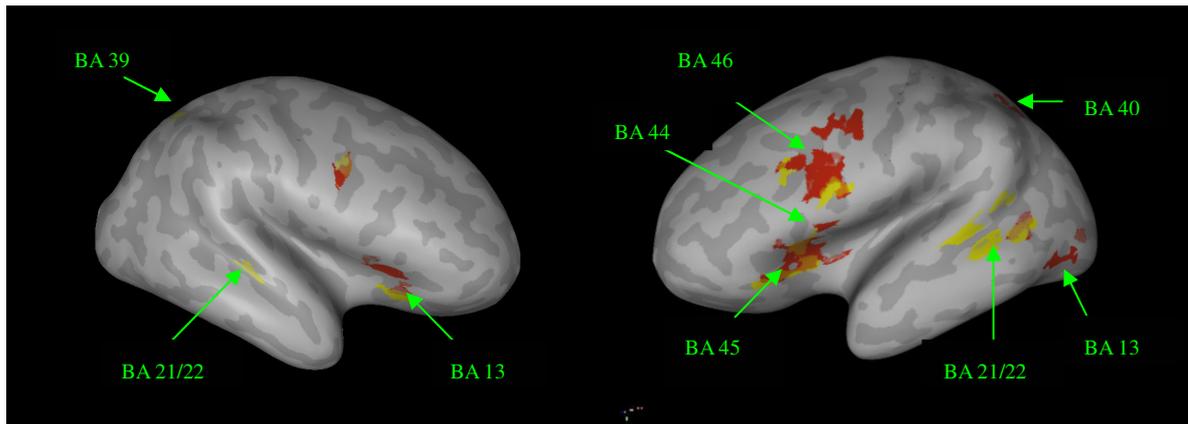


Abbildung 7:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe, die durch die Semantikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert). Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Semantik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Semantik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.2.2 Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (LAHP)

Die bei der LAHP-Gruppe durch die Verarbeitung von **italienischem** Satzmaterial hervorgerufenen Aktivierungen im direkten Vergleich entsprachen weitgehend denen der EAHP-Gruppe.

Ebenfalls ähnlich wie bei den Ergebnissen der EAHP-Gruppe im direkten Vergleich der Sprachen zeigte sich auch bei der LAHP-Gruppe im direkten Vergleich ein größeres und stärkeres Aktivierungsmuster durch die Verarbeitung des **deutschen** Satzmaterials. Dieses erstreckte sich jedoch über mehr Areale als bei der EAHP-Gruppe. Bei der Verarbeitung beider deutschen Konditionen (Semantik und Grammatik) stellten sich Aktivierungen im linken Temporallappen (BA 21, 22), im linken inferioren frontalen Gyrus (BA 44, 45, 46) und in der anterioren Insel (BA 13) beidseits dar. Weitere Aktivierungen zeigten sich für beide Bedingungen im supplementär-motorischen Areal, im linken precentralen Gyrus (BA 6), im linken Gyrus fusiformis (BA 37) und im linken Parietallappen (BA 40), vgl. Tabelle 7 und 8.

6.2.2.1 Grammatik

Bei den **italienischen** Grammatik-Aufgaben stellten sich beim direkten Vergleich keine Aktivierungen dar, vgl. Tabelle 7.⁷

Tabelle 7:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe der Grammatik-Konditionen im direkten Vergleich (Italienische gegen Deutsch und Deutsch gegen Italienisch)

Areale		Grammatik Italienisch	Grammatik Deutsch	Brodmann-Areal
BA 21/22	L		-54,50,0 -51,-32,0	424 235 superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L		-44,4,28*	2300 superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
SMA, 6			1,0,50	151 superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L		*** -31,-11,56	125 Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R			Gyrus precentralis / Frontallappen
BA 13	L		-31,19,6	614 Anteriore Insula
BA 37	L		-45,-59,-11 -46,-42,-17	822 122 Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 39	L		-27,-54,29	194 Gyrus angularis / Parietallappen
BA 40	L		-38,-46,29 -50,35,34	207 184 Gyrus supramarginalis/ Parietallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

Für die Verarbeitung **deutscher** Grammatik zeigten sich im direkten Vergleich Aktivierungen in den klassischen Spracharealen der linken Hemisphäre (BA 21/ 22 und BA 44), in der linken anterioren Insel, im linken Parietallappen (BA 39 und 40) und im linken Gyrus fusiformis (BA 37), wie er vorausgehenden Tabelle (Tabelle 7) aufgeführt und in der folgenden Abbildung (Abbildung 8) dargestellt.

⁷ Da beim Vergleich der Grammatikkonditionen miteinander keine Aktivierungen darstellbar waren, soll auf eine Abbildung verzichtet werden.

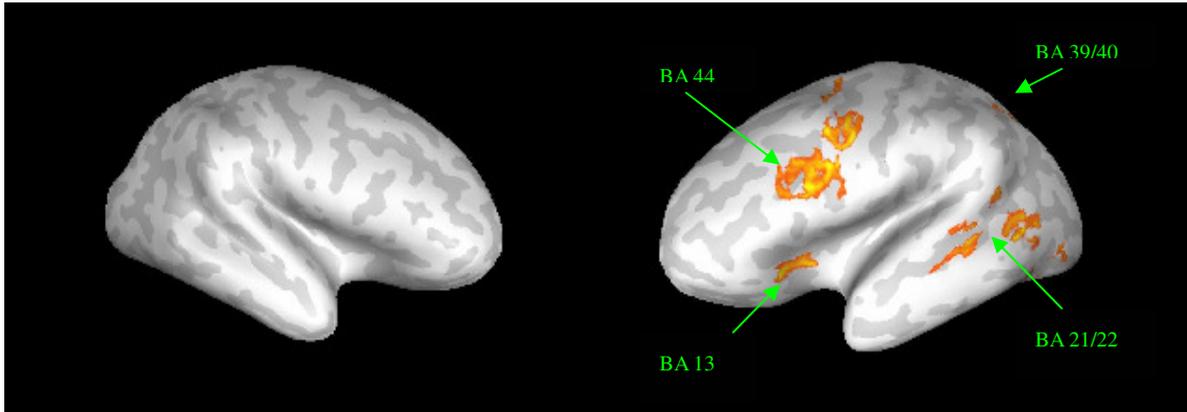


Abbildung 8:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Deutsch gegen Italienisch) durch das deutsche Grammatik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.2.2.2 Semantik

Bei der Verarbeitung von italienischem und deutschem Semantik-Material im direkten Vergleich waren die Aktivierungsmuster sehr unterschiedlich.

Bei der Verarbeitung **italienischen** Semantikmaterials im direkten Vergleich zeigten sich separat oder verstärkt aktivierte Areale im linken und rechten Temporallappen (BA 21/22) und im linken mittleren frontalen Gyrus (BA 10). Diese Aktivierungen werden in der folgenden Tabelle (Tabelle 8) aufgelistet und in der darauf folgenden Abbildung (Abbildung 9) dargestellt.

Tabelle 8:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe der Semantik-Konditionen im direkten Vergleich (Italienisch gegen Deutsch und Deutsch gegen Italienisch)

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Brodmann-Areal
BA 21/22	L	-57,-32,0	410			superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 21/22	R	44,-25,-6	265			superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L			-49,7,29* -52,10,4	340 106	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
SMA, 6				6,3,42 -2,8,48	108 88	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L			*** -45,-4,40 -52,-3,39	202 89	precentraler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	R			36,3,29	253	precentraler Gyrus/ Frontallappen
BA 13	R			27,20,10	109	Insula
BA 37	L			-42,-57,-11	335	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 39	L			-29,-59,41	281	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 40	L					Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 7	R			27,-66,45	121	Lobulus parietale superior/ Parietallappen
BA 10	L	-34,38,0	125			mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	R			16,42,4	573	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

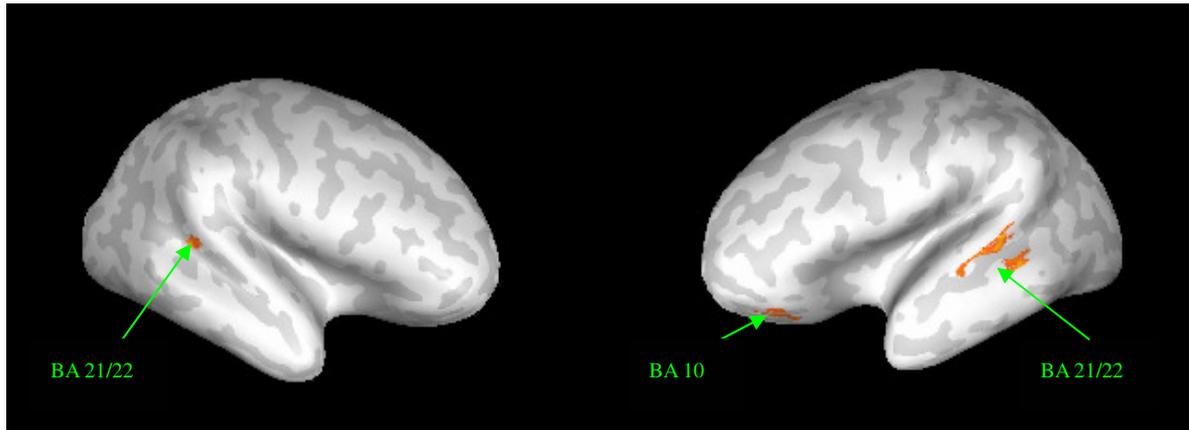


Abbildung 9:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Italienisch gegen Deutsch) durch das italienische Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

Wie aus der vorausgehenden Tabelle (Tabelle 8) ersichtlich, kam es bei der Verarbeitung von **deutschem** Semantik-Material im direkten Vergleich in der linken Hemisphäre neben den Aktivierungen im linken inferioren Frontallappen und im supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6) sowie im precentralen Gyrus (BA 6) zu einer Aktivierung im Parietallappen (BA 39) und im Gyrus fusiformis (BA 37). In der rechten Hemisphäre stellten sich weitere Aktivierungen im mittleren frontalen Gyrus (BA 10), in der anterioren Insula (BA 13) und im Parietallappen (BA 7) sowie im rechten Gyrus precentralis (BA 6) dar, vgl. Abbildung 10.

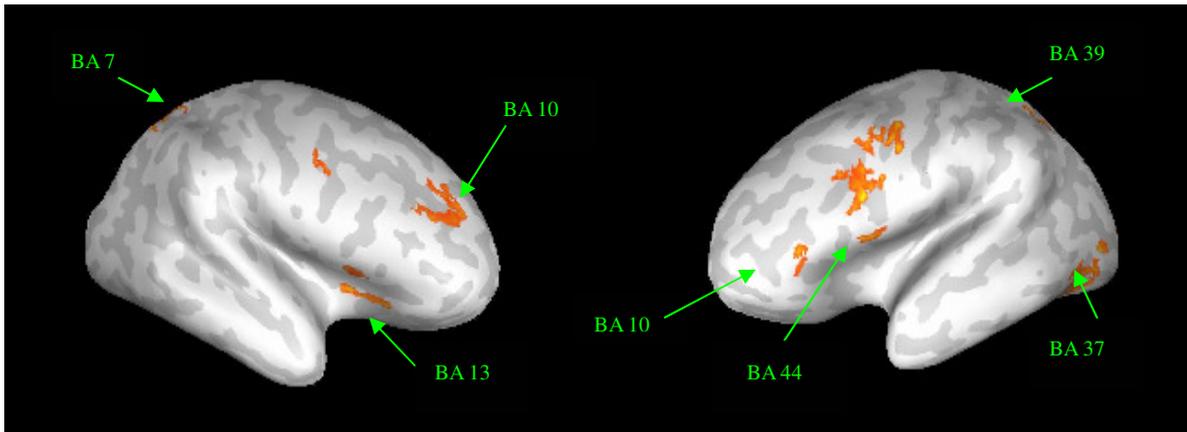


Abbildung 10:

Darstellung der Aktivierungen der LAHP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Deutsch gegen Italienisch) durch das deutsche Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.2.2.3 Zusammenfassung

Bei dem Vergleich der einzelnen Bedingungen gegen Ruhe kam es für die LAHP-Gruppe zur Aktivierung der bekannten sprachverarbeitenden Areale der linken Hemisphäre.

Weiter zeigte sich im direkten Vergleich der Aktivierungen vor allem der Unterschied der Aktivierungen durch die Grammatik-Aufgaben. Während im direkten Vergleich der Grammatik-Bedingungen miteinander wie bei der EAHP-Gruppe für die Verarbeitung von italienischem Grammatik-Material keine separaten oder verstärkt aktivierten Areale dargestellt werden konnten, ließen sich jedoch, anders als bei der EAHP-Gruppe, separate oder stärkere Aktivierungen durch die Verarbeitung von deutschem Grammatik-Material darstellen.

Die Aktivierungsmuster, die durch die Verarbeitung der Semantik-Aufgaben entstanden, sind bei der LAHP bei beiden Sprachen sehr ähnlich. Das entsprach weitgehend dem Ergebnis der EAHP-Gruppe.

Bei der Aktivierung mit semantischem Material traten bei der Verarbeitung beider Sprachen links fronto-temporal separat oder verstärkt aktivierte Areale auf. Gleichzeitig kam es wie bei der EAHP-Gruppe beim direkten Vergleich zu einer vermehrten Aktivierung durch die deutsche Semantik-Aufgabe.

Bei der LAHP-Gruppe kam es weiterhin bei beiden Konditionen in beiden Sprachen zu einer im Vergleich mit der EAHP-Gruppe stärkeren Aktivierung der rechten Hemisphäre und der Parietalregionen (beidseitig).

6.3 Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Leistungsniveau (LALP)

Wie bei den beiden vorhergehenden Gruppen werden auch für die LALP-Gruppe zuerst die BOLD-Signal-Änderungen der einzelnen Bedingungen bei Aktivierung durch das Grammatik-Material und dann durch das Semantik-Material gegen Ruhe dargestellt. Anschließend werden die Aktivierungsmuster der einzelnen Konditionen im direkten Vergleich dargestellt. In jedem Abschnitt werden erst die Aktivierungen durch die Verarbeitung von Grammatik-Material und dann von Semantik-Material aufgeführt.

6.3.1 Vergleich der Aktivierungen durch das Satzmaterial gegen Ruhe (LALP)

Bei der LALP-Gruppe kam es bei der Verarbeitung aller Konditionen im Vergleich gegen Ruhe zu Aktivierungen im linken inferioren frontalen Gyrus (BA 44/ 45), im supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6), im linken Gyrus precentralis (BA 6) sowie im linken Gyrus angularis (BA 40).

Durch die Verarbeitung des **italienischen** Satzmaterials im Vergleich gegen Ruhe wurde zudem bei beiden Bedingungen ein weiteres Areal im linken Frontallappens (BA 9) aktiviert.

Das Aktivierungsmuster, das bei dieser Gruppe durch das **deutsche** Satzmaterial hervorgerufen wurde, zeigte bei dem gleichen Threshold wie bei den beiden anderen Probandengruppen (EAHP und LAHP) und einem annähernd gleichen F-Wert (nur geringfügig durch einen zusätzlichen Probanden verändert (F=2.5541 gegen F=2.4617), wesentlich größere und stärker aktivierte Areale, eine stärkere Beteiligung der rechten Hemisphäre sowie eine Einbeziehung extrakortikaler Strukturen, wie Thalamus, Putamen und Nucleus caudatus.

Für beide Konditionen stellten sich neben den Aktivierungen im linken inferioren Frontallappen (BA 44/ 45), aktivierte Areale in der rechten Hemisphäre im mittleren Frontallappen (BA 9), in der anterioren Insula (BA 13), im Parietallappen (BA 40) und im Gyrus fusiformis (BA 37) dar.

6.3.1.1 Grammatik

Bei der Verarbeitung von Grammatikmaterial in beiden Sprachen im Vergleich mit Ruhe kam es neben den Aktivierungen, die durch die Verarbeitung aller Konditionen hervorgerufen wurden, zu Aktivierungen im linken mittleren Frontallappen (BA 9) und im linken Gyrus fusiformis (BA 37).

Die Verarbeitung des **italienischen** Grammatikmaterials im Vergleich gegen Ruhe führte neben denen durch alle Konditionen aktivierten Arealen zu Aktivierungen im linken inferioren Frontallappen, in der linken anterioren Insula (BA 13) und im linken Parietallappen (BA 40).

Durch die Verarbeitung **deutschen** Grammatikmaterials hingegen wurden weitere aktivierte Regionen im linken Temporallappen (BA 21/22), im linken Parietallappen (BA 39 und 7) sowie Aktivierungen in der rechten Hemisphäre im mittleren Frontallappen (BA 9 und 10), in der anterioren Insula (BA 13), im Parietallappen (BA 40 und 7) und im Gyrus fusiformis (BA 37) hervorgerufen.

Weiter kam es zur Aktivierung extrakortikaler Strukturen (im linken Thalamus, im linken Putamen und im rechten Nucleus caudatus), vgl. Tabelle 9 und Abbildung 11.

Tabelle 9:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe im Vergleich der Grammatik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Grammatik Italienisch		Grammatik Deutsch		Brodmann-Areal
BA 21/22	L			-50,-39,0	121	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	-50,4,12	88			inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 45	L	-49,16,10	108	-41,11,22*	23735	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6		0,9,48	181	-1,14,44	5533	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	-42,0,33*	2641	***		Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R			37,12,32*	7570	Gyrus precentralis / Frontallappen
BA 13	L			***		Insula
BA 13	R			33,17,7	2861	Insula
BA 37	L	-41,-59,-16	202	-43,-57,11	3873	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 37	R			35,-59,-15	365	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 39	L			27, -56,35	2310	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 40	L	-38,-43,37	345	-35,-52,38*	9901	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 40	R			*** 38,-41,39	303	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 7	L			***		Lobulus superior parietale/ Parietallappen
BA 7	R			27,-56,35* 14,-62,40	2310 143	Lobulus superior parietale/ Parietallappen
BA 9	L	***		***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	R			***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	R			***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
Thalamus	L			-11,-15,6	233	
Putamen	L			-18,-2,12	1815	
Caudatus	R			10,-1,16	1308	

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

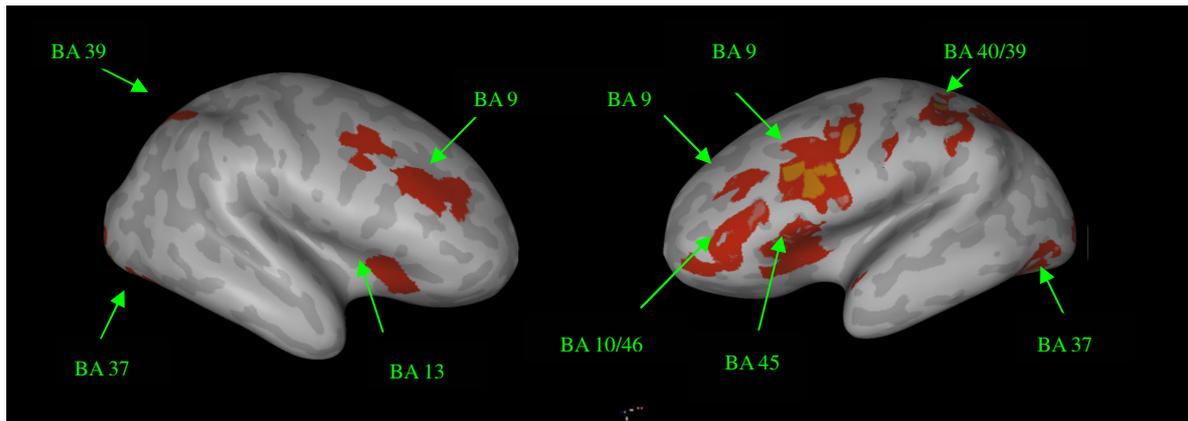


Abbildung 11:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe, die durch die Grammatikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Grammatik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Grammatik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.3.1.2 Semantik

Die Verarbeitung von semantischem Material in beiden Sprachen führte neben den durch alle Konditionen aktivierten Arealen in der linken Hemisphäre, im linken inferioren Frontallappen (Ba 44/45), im supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6), im precentralen Gyrus und im Parietallappen (BA 40), zu Aktivierungen im linken Temporallappen (BA 21/22), in der linken und rechten anterioren Insula (BA 13) und im rechten mittleren frontalen Gyrus (BA 9).

Durch das **italienische** Semantik-Material im Vergleich gegen Ruhe wurden weiterhin Areale im linken Frontallappen (BA 8, 9 und 10), im linken Parietallappen (BA 7) sowie im rechten precentralen Gyrus (BA 6) aktiviert, vgl. Tabelle 10.

Regionen, die durch die Verarbeitung von **deutschem** Semantik-Material aktiviert wurden, zeigten sich im rechten Temporallappen (BA21/22), im linken und rechten Gyrus fusiformis (BA 37) und im rechten Parietallappen (BA 40), vgl. Tabelle 10) und Abbildung 12.

Tabelle 10:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe im Vergleich der Semantik-Konditionen gegen Ruhe

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Brodmann-Areal
BA 21/22	L	-57,-53,0	139	-50,-13,-5	1672	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 21/22	R			45, -20,-5	442	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 44	L	***				inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 45	L	***		-42,11,23*	23280	inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6		-1,8,48	304	0,14,44	5444	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L	***		***		Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R	34,1,36	121			Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L	-37,28,6*	1471	*** -31,0,2	91	Insula
BA 13	R	31,22,7	139	10,-5,20	367	Insula
BA 37	L			-16,-73,-6*	23103	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 37	R			6,-74,-6*	18383	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 40	L	-36,-63,45	177	-36,-48,38 -53,-40,30 -59,-18,13	8581 130 100	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 40	R			28,-47,34	1037	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 7	L	-24,-60,44	90			Lobulus superior parietale/ Parietallappen
BA 8	L	-7,27,45	174			superiorer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	L	-43,8,29*	2763			mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	R	36,13,31	388	35,13,23*	7453	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	L	***				mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Areale mit ein.

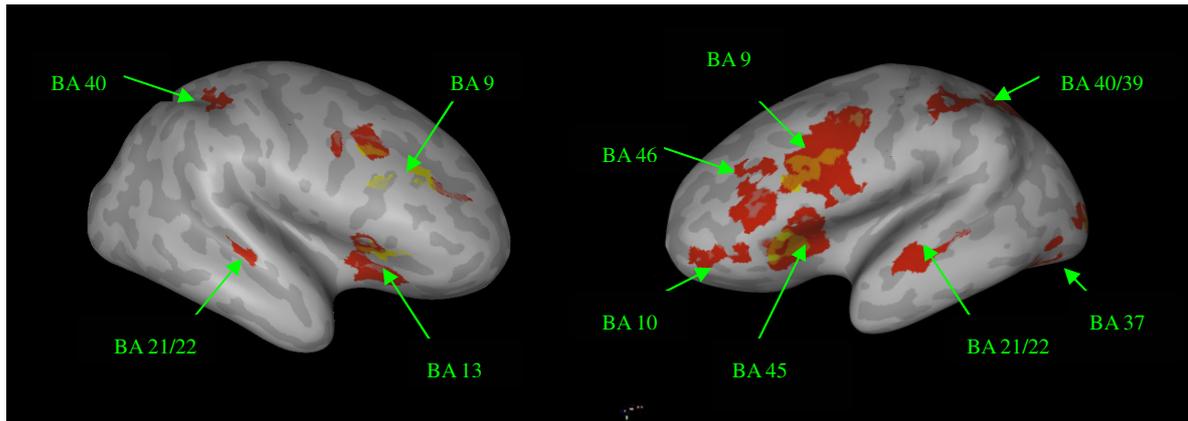


Abbildung 12:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe, die durch die Semantikaufgaben in beiden Sprachen (Italienisch und Deutsch) gegen Ruhe hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die gelben Markierungen entsprechen den Aktivierungen durch das italienische Semantik-Material und die roten Markierungen den Aktivierungen durch das deutsche Semantik-Material. Durch beide Sprachen aktivierte Areale werden orange dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.3.2 Ergebnisse des direkten Vergleiches der Sprachen (LALP-Gruppe)

Wie bei den beiden anderen Gruppen wurden auch bei der LALP-Gruppe nach Darstellung der einzelnen Konditionen gegen Ruhe, die Aktivierungen der Grammatik- und Semantik-Kondition mit den jeweiligen Aktivierungen der entsprechenden Kondition in der zweiten Sprache verglichen.

Bei der LALP-Gruppe zeigte sich noch deutlicher als bei der LAHP-Gruppe eine stärkere Aktivierung durch die Zweitsprache (Deutsch). Dies zeigte sich auch im direkten Vergleich der Aktivierungen, die durch die Zweitsprache entstanden sind, mit denen, die bei der Verarbeitung der Erstsprache auftraten.

In diesem Fall ergab sich ein Aktivierungsmuster mit großen, sehr weitflächigen Aktivierungen, die sich jeweils über mehrere Brodmann-Areale erstreckten.

Bei der Verarbeitung des **deutschen** Satzmaterials für beide Konditionen zeigte sich über dem inferior frontalen Gyrus ein sehr großes aktiviertes Gebiet, das sich über mehrere Brodmann-Areale erstreckte. Bei beiden Konditionen waren die Brodmann Areale 10, das supplementär-motorische Areal (SMA/ BA 6), Areale im Gyrus precentralis (BA 6) und in der linken anterioren Insel (BA 13) aktiviert. Ebenfalls bei beiden Konditionen stellten sich im direkten Vergleich Aktivierungen im linken Parietallappen (BA 40) und im linken Gyrus fusiformis (BA 37) dar. Im rechten Frontallappen (BA 6 und 9) und in der rechten anterioren Insel (BA 13) wurden ebenfalls Gebiete durch beide Konditionen aktiviert.

Auch kam es bei beiden Konditionen zur Aktivierung extrakortikaler Strukturen. Durch beide Konditionen wurde der linke Thalamus und der linke Nucleus caudatus aktiviert.

6.3.2.1 Grammatik

Für die Verarbeitung **italienischen** Grammatik-Materials im direkten Vergleich zeigten sich keine separat oder verstärkt aktivierten Gebiete, vgl. Tabelle 11.⁸

Durch die Verarbeitung **deutschen** Grammatik-Materials hingegen kam es in der linken Hemisphäre zu Aktivierungen im inferioren und mittleren frontalen Gyrus (BA 9), im supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6), im precentralen Gyrus (BA 6), in der anterioren Insula (BA 13), im Parietallappen (BA 40 und 7) sowie im Gyrus fusiformis (BA 37). Weiter kam es in der rechten Hemisphäre zu Aktivierungen im precentralen Gyrus (BA 6), in der anterioren Insula (BA 13) und im Parietallappen (BA 39). Zudem wurden extrakortikale Strukturen aktiviert (Thalamus und Putamen links und der rechte Nucleus caudatus), vgl. Tabelle 11 und Abbildung 13.

⁸ Da beim Vergleich der Grammatik-Konditionen miteinander keine Aktivierungen darstellbar waren, soll auf eine Abbildung verzichtet werden.

Tabelle 11:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe der Grammatik-Konditionen im direkten Vergleich Italienisch gegen Deutsch und Deutsch gegen Italienisch

Areale		Grammatik		Gehirnstruktur	
		Italienisch	Deutsch		
BA 45	L		***		inferior frontaler Gyrus/ Frontallappen
SMA, 6			-1,13,44	3192	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L		-41,11,23*	17576	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R		37,11,32*	5299	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L		***		Anteriore Insel
BA 13	R		33,17,7	2330	Anteriore Insel
BA 37	L		-43,-57,-11	2527	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 39	R		26,-54,34	1155	Gyrus angularis/ Parietallappen
BA 40	L		-35,-53,37*	7279	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 7	L		***		Lobulus parietale superior/ Parietallappen
BA 9	R		***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	L		-34,50,15	113	mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
Thalamus	L		-11,-15,6	183	
Putamen	L		18,-3,17	1108	
Caudatus	R		10,-3,17	869	

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Arealen mit ein.

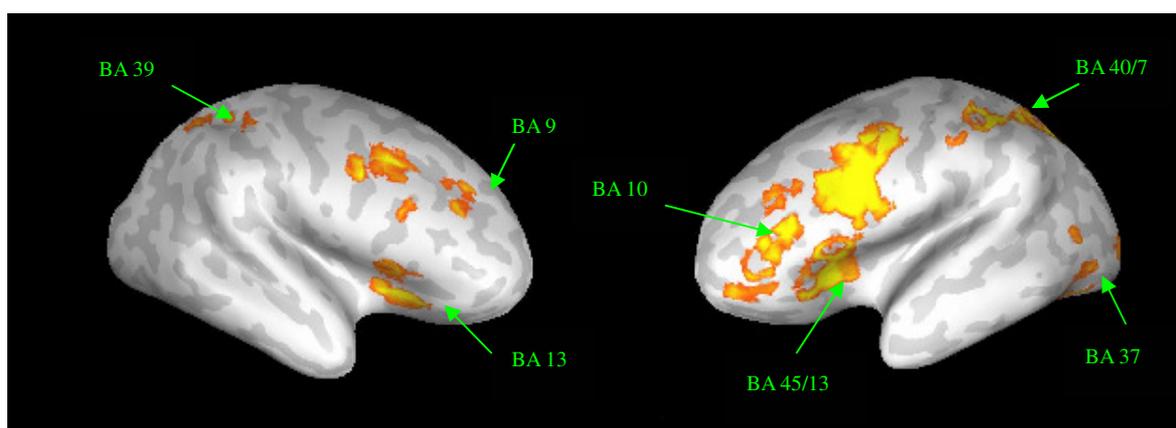


Abbildung 13:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Deutsch gegen Italienisch) durch das deutsche Grammatik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert). Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.3.2.2 Semantik

Im direkten Vergleich der Aktivierungen, die durch das **italienische** Semantikmaterial hervorgerufen wurden, zeigte sich für die Semantik-Kondition ein aktiviertes Areal im linken Gyrus fusiformis (BA 37), vgl. Tabelle 12 und Abbildung 14.

Tabelle 12:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe der Semantik-Konditionen im direkten Vergleich Italienisch gegen Deutsch und Deutsch gegen Italienisch

Areale		Semantik Italienisch		Semantik Deutsch		Gehirnstruktur
BA 21/22	L			-50,-14,-5	1385	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
BA 21/22	R			45,-20,-5	409	superior und mittlerer temporaler Gyrus/ Temporallappen
SMA, 6				0,13,44	3340	superior und mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 6	L			-43,8,26*	12555	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 6	R			36,8,33*	2493	Gyrus precentralis/ Frontallappen
BA 13	L			***		Anteriore Insel
BA 13	R			32,16,7	1884	Anteriore Insel
BA 37	L	-57,-3,1	113	-15,-71,6*	12699	Gyrus fusiformis/ Temporallappen
BA 40	L			-36,-48,36 -59,-18,13	5229 98	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 40	R			30,-41,35	405	Gyrus supramarginalis/ Parietallappen
BA 9	L			***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 9	R			***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
BA 10	L			***		mittlerer frontaler Gyrus/ Frontallappen
Thalamus	L			-12,-16,5	657	
Thalamus	R			3,-19,7	193	
Caudatus	R			9,-5,18	183	

In der ersten Spalte stehen die Brodmann-Areale in der sich das aktivierte Areal befindet, in den darauf folgenden Spalten die jeweilige Hemisphäre, die Lokalisation, die Clustergröße und die entsprechende Hirnstruktur in der letzten Spalte.

In den beiden Spalten für die Aktivierungen bei der Semantik- bzw. der Grammatikkondition werden als erstes die Koordinaten des jeweils signifikantesten Pixels entsprechend dem Talairach-Atlas (Talairach & Tournoux, 1988) angegeben, in Klammern gefolgt von der Clustergröße der aktivierten Region.

Die mit * markierten Aktivierungen erstrecken sich über mehr als nur ein Brodmann-Areal und schließen die mit *** markierten Arealen mit ein.

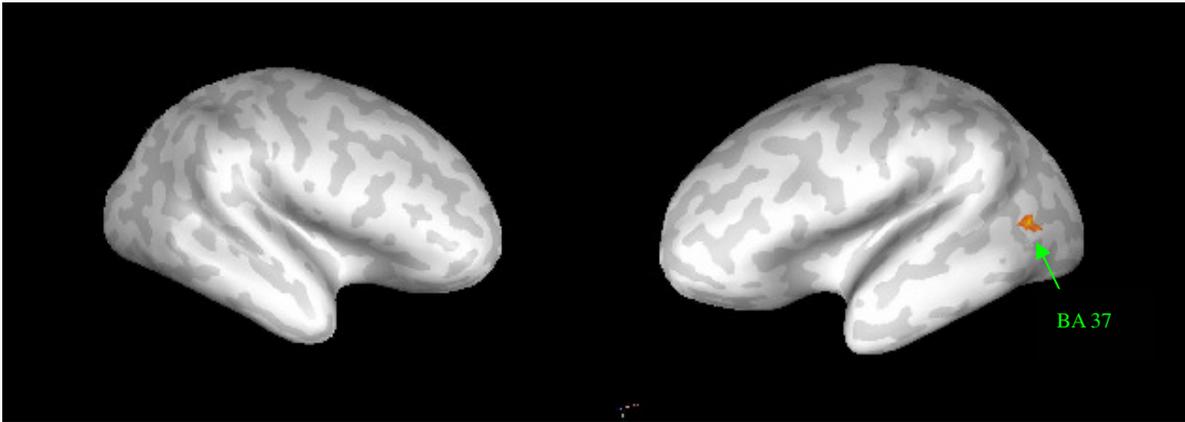


Abbildung 14:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Italienisch gegen Deutsch) durch das italienische Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

Im Vergleich des semantischen Satzmaterials beider Sprachen zeigten sich für die Verarbeitung **deutschen** Satzmaterials Aktivierungen im linken und rechten Temporallappen (BA 21,22), im linken und rechten mittleren frontalen Gyrus (BA 9 und 10), im supplementär-motorischen Areal (SMA, BA 6), im linken und rechten precentralen Gyrus (BA 6), in der linken und rechten anterioren Insula (BA 13), im linken und rechten Parietallappen (BA 40), im linken Gyrus fusiformis (BA 37) und im linken und rechten Thalamus sowie im rechten Nucleus caudatus. Diese Aktivierungen sind in der vorausgehenden Tabelle (Tabelle 11) aufgeführt und in der folgenden Abbildung (Abbildung 15) dargestellt (mit Ausnahme der Aktivierungen in extrakortikalen Arealen).

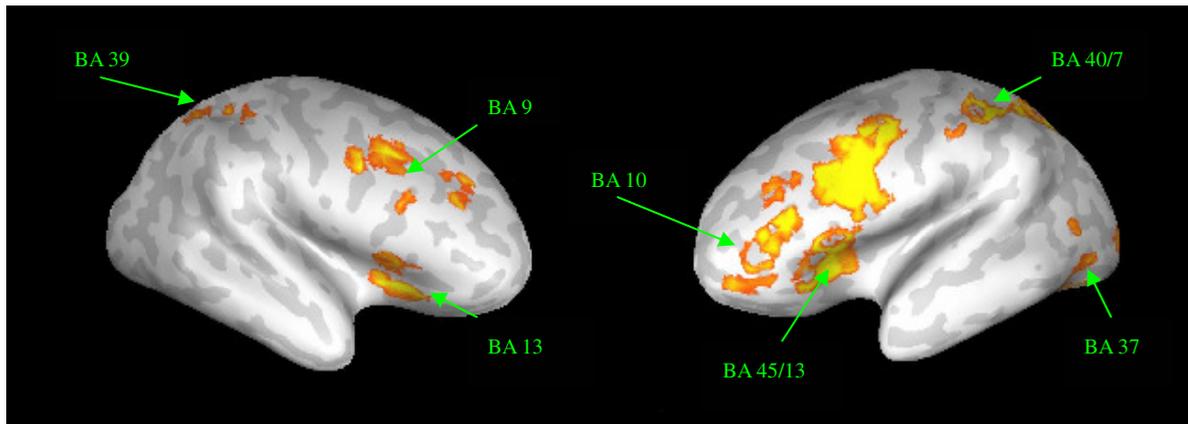


Abbildung 15:

Darstellung der Aktivierungen der LALP-Gruppe, die im direkten Vergleich (Deutsch gegen Italienisch) durch das deutsche Semantik-Material separat oder verstärkt hervorgerufen wurden. Die hervorgerufenen Aktivierungen sind auf die aufgefalteten Hemisphären eines Gehirn-Modells (Gyri Hellgrau, Sulci Dunkelgrau projiziert. Die linke Hemisphäre ist rechts und die rechte Hemisphäre links dargestellt. Die stärker aktivierten Voxel sind gelb, die schwächer aktivierten Voxel rot dargestellt. Die aktivierten Areale sind durch Pfeile gekennzeichnet und die jeweiligen Brodmann-Areale (BA) vermerkt.

6.3.2.3 Zusammenfassung

Beim Vergleich der einzelnen Aktivierungsmuster gegen Ruhe zeigten sich aktivierte Areale in den bekannten Spracharealen bei allen vier Bedingungen (mit Ausnahme des linken Temporallappens bei der italienischen Grammatik-Bedingung).

Werden jedoch die jeweiligen Bedingungen der einzelnen Sprachen miteinander verglichen, stellten sich durch die italienische Grammatik-Aufgabe keine Gebiete dar, die separat oder stärker als bei der Verarbeitung der deutschen Grammatik-Aufgaben aktiviert wurden.

Durch die Verarbeitung der italienischen Semantik-Kondition konnte nur ein separat oder verstärkt hervorgerufenes Areal im linken Gyrus fusiformis dargestellt werden.

Durch die Verarbeitung von deutschem grammatikalischen und semantischen Satzmaterial kam es zu einem großen und starken Aktivierungsmuster mit deutlicher Einbeziehung der rechten Hemisphäre und extrakortikaler Strukturen.

7 DISKUSSION

7.1 Einleitung

Im Folgenden sollen nach einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse im ersten Abschnitt der Einfluss des Alters bei Spracherwerb und dann im zweiten Abschnitt die Auswirkung des Leistungsniveaus auf die kortikale Organisation diskutiert werden. In den beiden Abschnitten soll zuerst auf die Grammatikverarbeitung und dann auf die Semantikverarbeitung eingegangen werden. Danach soll die Auswirkung des Alters bei Spracherwerb und des Leistungsniveaus auf die Sprachverarbeitung insgesamt erläutert werden.

Im Anschluss daran folgen eine Zusammenfassung der Diskussion und die Schlussfolgerungen.

7.1.1 Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten, dass sich das Alter bei Spracherwerb erheblich auf die kortikale Organisation auswirkt, im Besonderen auf die Verarbeitung von grammatikalischem Material.

Bei allen drei Gruppen zeigte sich, dass durch die Verarbeitung von Grammatik-Material in der Erstsprache keine Areale separat oder verstärkt aktiviert wurden.

Bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb stellten sich bei der Grammatik-Verarbeitung beider Sprachen keine separat oder verstärkt aktivierten Areale dar. Das heißt, dass bei parallelem Spracherwerb die Grammatik-Verarbeitung beider Sprachen in denselben Arealen stattfand.

Bei den Gruppen mit spätem Spracherwerb jedoch stellten sich durch die Verarbeitung von Grammatik-Aufgaben in der spät erlernten Zweitsprache separat oder verstärkt aktivierte Areale dar. Das bedeutet, dass die Verarbeitung von Grammatik-Material in einer spät erlernten Zweitsprache neben Arealen, die an der Verarbeitung der Erstsprache beteiligt sind, zur Aktivierung zusätzlicher Areale führte.

Die Verarbeitung von semantischem Material dagegen scheint stärker durch das Leistungsniveau beeinflusst zu werden. Bei beiden Gruppen mit guten Sprachkenntnissen traten separat oder verstärkt aktivierte Areale im inferioren Frontallappen und im

Temporallappen auf. Bei der Gruppe mit spätem Spracherwerb und niedrigem Leistungsniveau zeigten sich bei der Verarbeitung von Semantik-Aufgaben in der Erstsprache keine Aktivierungen in diesen Arealen.

Des Weiteren kam es bei der Verarbeitung von Semantikmaterial bei beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau durch das deutsche Satzmaterial zu verstärkten Aktivierungen in den klassischen Spracharealen (linker inferiorer Frontallappen und linker Temporallappen). Auch bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau zeigte sich eine wesentlich größer Aktivierung durch das deutsche Semantikmaterial.

Bei den Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb kam es bei beiden Sprachprozessen (Grammatik und Semantik) bei der Verarbeitung der spät erlernten Zweitsprache unabhängig vom Leistungsniveau zur Aktivierung von Arealen der rechte Hemisphäre und des Parietallappens beidseits.

In Abhängigkeit des Leistungsniveaus hingegen, kam es bei der Gruppe mit spätem Spracherwerb und niedrigem Leistungsniveau durch die spät erlernte Zweitsprache zur Aktivierung extrakortikaler Strukturen, die bei beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau nicht auftraten.

7.2 Alter bei Zweitspracherwerb

7.2.1 Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Grammatik

7.2.1.1 Unterschiede bei parallelem und seriellem Zweitspracherwerb

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine deutliche Auswirkung des Alters bei Spracherwerb auf die Verarbeitung der Grammatik. Während die Verarbeitung grammatikalischen Materials bei parallelem Spracherwerb für beide Sprachen in den gleichen Arealen stattzufinden scheint, werden bei spätem Zweitspracherwerb durch die Zweitsprache zusätzliche Areale separat oder vermehrt aktiviert. Diese Tatsache wird bei der Betrachtung der Aktivierungsmuster im Vergleich mit Ruhe und im direkten Vergleich der Sprachen miteinander besonders deutlich. Bei allen Gruppen konnten durch die Verarbeitung von Grammatik-Aufgaben in beiden Sprachen im Vergleich mit Ruhe Aktivierungen dargestellt werden. Dies bedeutet, dass es durch die Verarbeitung von Grammatik-Aufgaben bei beiden Sprachen für alle drei Gruppen zu Aktivierungen in den klassischen Spracharealen und weiteren Arealen kommt. Werden nun aber die

Aktivierungsmuster, die durch die Grammatik-Verarbeitung in den beiden Sprachen hervorgerufen wurden, direkt miteinander verglichen, stellten sich bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau keine durch eine Sprache separat oder verstärkt aktivierten Areale dar. Somit kann darauf geschlossen werden, dass bei parallelem Spracherwerb die Grammatik-Verarbeitung beider Sprachen in den gleichen Arealen stattfindet. Bei beiden Gruppen mit spätem Spracherwerb hingegen kam es beim direkten Vergleich zur separaten oder verstärkten Aktivierung von Arealen durch die Verarbeitung von Grammatik-Material in der spät erlernten Zweitsprache, nicht jedoch durch die Erstsprache. Das bedeutet, dass bei spätem Zweitspracherwerb die Grammatik-Verarbeitung der spät erworbenen Zweitsprache nicht der Grammatik-Verarbeitung einer parallel erworbenen Zweitsprache entspricht und das Alter bei Zweitspracherwerb somit einen deutlichen Einfluss auf die Grammatik-Verarbeitung der Zweitsprache hat.

In der Literatur gibt es mehrere Studien, die sich mit dem Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Verarbeitungsprozesse der Sprache beschäftigen. Einige Studien konnten anhand von bildgebenden Verfahren aber auch mit psychologischen Verhaltens-Tests Unterschiede zwischen frühem und spätem Spracherwerb feststellen (Weber-Fox & Neville, 1996; Bialystok 1999). Andere Studien jedoch zeigten keine Differenzen zwischen frühem und spätem Spracherwerb. Allerdings setzten sich nur wenige dieser Untersuchungen dabei gezielt mit der Einwirkung des Erwerbalters auf die Teilprozesse (Grammatik/ Semantik) der Sprache auseinander, sondern führten die Untersuchungen bei allgemeiner Sprachrezeption oder Produktion durch.

Eine Ausnahme ist die Studie von Weber-Fox und Neville, die mittels ERP und Verhaltensuntersuchungen erhobene Studie Unterschiede bei der Verarbeitung von Grammatik und Semantik fand. Es wurden mehrere Gruppen untersucht, die mit unterschiedlichem Alter eine zweite Sprache (Englisch) erlernt hatten und mit einer Gruppe von einsprachigen Probanden verglichen. Die Untersuchung ergab, dass bei der Verarbeitung von Grammatik-Aufgaben das Aktivierungsmuster bei allen Gruppen, die der Zweitsprache nach dem 2. Lebensjahr ausgesetzt waren von dem der einsprachigen Probanden abwich. Die Verarbeitung von semantischem Satzmaterial hingegen zeigte nur bei den Gruppen mit spätem Spracherwerb (nach dem 11. Lebensjahr) eine abweichende Antwort. Aus diesen Ergebnissen schlossen Weber und Fox auf eine unterschiedliche Auswirkung des Erwerbalters auf die Teilprozesse der Sprache (Grammatik/ Semantik) und auf spezifische sensitive Phasen für diese Teilprozesse (Weber-Fox & Neville, 1996).

Im Hinblick auf die vorliegenden Studien stimmen die Ergebnisse der Studie von Weber und Fox mit den hier vorgestellten Ergebnisse insofern überein, dass das Alter, in dem es zur Konfrontation mit einer Zweitsprache kommt, Einfluss auf die Verarbeitung der Grammatik in der Zweitsprache hat.

Bei Weber-Fox und Neville zeigt sich eine Differenz in der Grammatikverarbeitung im Vergleich mit Monolingualen schon bei einer Gruppe, die der zweiten Sprache ab einem Alter von 1-3 Jahre ausgesetzt waren. Dabei wird allerdings das Alter der Immigration in das Land der Zweitsprache als Exposition angegeben. Die Exposition für die Sprachen wurde nur für ein Alter bis zum 6. Lebensjahr (Vorschulalter) erfragt und von den Probanden dieser Gruppe im Schnitt mit $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ der Zeit für die Zweitsprache angegeben.

In der hier vorgestellten Studie hingegen waren die Probanden der Gruppe mit parallelem Spracherwerb beider Sprachen seit der Geburt ausgesetzt (nach eigenen Angaben der Probanden zu mindestens 17% der gesamten Sprachexposition, im Durchschnitt 40%). Probanden der Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb hingegen hatten vor dem 7. Lebensjahr keinen oder kaum intensiveren Kontakt mit der Zweitsprache. Die Altersgrenze von 6 Jahren war aufgrund von mehrerer Studien gewählt worden (Perani, 1996; Dehaene, 1997; Chee, 2000).

Die Ergebnisse der Studie von Weber-Fox zeigen, dass es schon bei einem Zweitspracherwerb im Vorschulalter zu einer Veränderung bei der Grammatik-Verarbeitung kommt (hier im Vergleich mit einsprachigen Probanden).

Die Tatsache, dass das Alter bei Zweitspracherwerb einen erheblichen Einfluss auf die Grammatik-Verarbeitung hat, konnte auch durch eine Verhaltensstudie von Bialystok und Miller bestätigt werden (Bialystok & Miller, 1999). Diese ergab, dass sich bei einer Gruppe von spanischen Muttersprachlern (L2 = Englisch) im Vergleich mit einer Gruppe englischer Muttersprachler (L1 = Englisch) bei der grammatikalischen Beurteilung der Erst- und Zweitsprache signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter bei Zweitspracherwerb (früher Zweitspracherwerb <15 Jahre, später Zweitspracherwerb >15 Jahren) darstellte. Dass bei einer anderen Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb (mit Chinesisch als Muttersprache) eine solche Differenz allerdings nicht dargestellt werden konnte, führte Bialystok auf ein eventuell unterschiedliches Leistungsniveau zurück.⁹

⁹ In einer fMRT-Studie von Luke der sich mit grammatikalischen und semantischen Verarbeitungsprozessen bei zweisprachigen Probanden (L1 = Chinesisch) befasste, konnten keine Unterschiede zwischen den

7.2.2 Differenzen zwischen parallelem und seriellem Spracherwerb

Die hier vorgestellten Daten zeigen somit einen deutlichen Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb, der durch die hier aufgeführten Studien bestätigt werden konnte. In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, wie sich dieser Einfluss darstellt und wie die verschiedenen Aktivierungsmuster erklärt werden können.

In den folgenden zwei Abschnitten sollen paralleler (früher) und serieller (später) Zweitspracherwerb in Bezug auf die Verarbeitung von Grammatik noch näher erläutert werden.

7.2.2.1 Paralleler Spracherwerb (früher Zweitspracherwerb)

Die vorliegenden Daten zeigen, dass durch die Grammatik-Verarbeitung in der spät erlernten Zweitsprache zusätzliche Areale aktiviert werden, die nicht, oder bedeutend schwächer, an der Grammatik-Verarbeitung in der Erstsprache beteiligt sind. Bei parallelem Spracherwerb werden keine zusätzlichen Areale bei der Verarbeitung des Grammatik-Materials einer der gleichzeitig erlernten Sprachen aktiviert. Das lässt darauf schließen, dass Grammatik in parallel erlernten Sprachen (früher Zweitspracherwerb) in gleichen kortikalen Strukturen verarbeitet wird und dass die Verarbeitung von Grammatik-Material in einer spät erlernten Zweitsprache neben den an der Verarbeitung der Grammatik in der Erstsprache beteiligten Arealen auch andere, zusätzliche, kortikale Strukturen aktiviert.

Diese Ergebnisse decken sich mit der von Volterra und Taeschner anhand von Verhaltensstudien aufgestellte Theorie, dass bei parallelem Spracherwerb nur ein Grammatiksystem ausgebildet wird. In dem von Volterra und Taeschner 1978 aufgestellten Drei-Phasen-Modell (siehe 2.2.3 Paralleler Zweitspracherwerb) werden die bei parallelem Spracherwerb erlernten Grammatik-Regeln zu Beginn auf beide Sprachen angewandt, bis sie im weiteren Verlauf der Entwicklung den Sprachen richtig zugeordnet und getrennt verwendet werden können (Volterra & Taeschner, 1978). Aber auch die Theorie, dass zwar eine Unterscheidung der beiden Sprachen von Anfang an möglich sei, die Fähigkeit zur

semantischen und den grammatikalischen Aktivierungsmustern für die chinesische Sprache festgestellt werden. Die Untersucher führten dies auf die Natur der chinesischen Sprache zurück, bei der Semantik und Grammatik oft nicht klar zu trennen sind (Luke, 2002).

Verwendung von Regeln und Worten in nur einer Sprache aber erst erlernt werden müsse (Genesee, 1996; Grosjean, 2001), ist mit den vorliegenden Ergebnissen denkbar.

Beide Theorien können durch die Ergebnisse dieser Studie weder bestätigt noch widerlegt werden. Gezeigt werden kann jedoch, dass eine sich später entwickelnde bewusste Trennung von Grammatik-Strukturen der einen Sprache von denen der anderen, bzw. die Fähigkeit diese separat zu gebrauchen, auf einen selektiven Zugriff auf die entsprechenden kortikalen Strukturen zurückzuführen ist und nicht auf eine Aktivierung unterschiedlicher kortikaler Areale.

Weiter ergibt sich aus den hier vorgestellten Ergebnissen die Frage, ob sich die signifikanten Unterschiede zwischen der grammatikalischen Verarbeitung in der Erstsprache und einer später erlernten Zweitsprache dadurch erklären lassen, dass beim späten Zweitspracherwerb (nach dem 5. bzw. 7. Lebensjahr) die Grammatik nicht als neues und „komplettes“ Grammatiksystem erlernt wird, sondern beim Erwerb als Zweitsprache auf die Grammatik der Erstsprache zurückgegriffen und auf dieser aufgebaut wird.

7.2.2.2 Serieller Spracherwerb (später Zweitspracherwerb)

Aus den hier präsentierten Daten geht hervor, dass zur Verarbeitung von grammatikalischen Aufgaben in der später erlernten Zweitsprache die neuronalen Strukturen, die bei der Grammatik-Verarbeitung der Erstsprache beteiligt sind in Anspruch genommen und darüber hinaus weitere kortikale Regionen aktiviert werden. Während beim Vergleich der einzelnen Grammatik-Konditionen gegen Ruhe Areale für beide Sprachen aktiviert wurden, konnten im direkten Vergleich nur für die Verarbeitung deutscher Grammatik separat oder verstärkt aktivierte Areale dargestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass bei einer nach abgeschlossenem Erstspracherwerb erlernten Zweitsprache die am Grammatikprozess der Erstsprache beteiligten Areale genutzt werden und die Grammatik der Zweitsprache auf dem Grammatiksystem der Erstsprache aufbaut.

Dies konnte in einer Studie von Hartsuiker, mittels mit Cross-Linguistic Syntactic Priming¹⁰ bei einer Gruppe mit spätem Spracherwerb und guten Sprachkenntnissen nachgewiesen werden. Die Probanden griffen bei der Verarbeitung von Grammatik-

¹⁰ Cross-Linguistic Syntactic Priming: Grammatik-Strukturen werden in einer Sprache angeboten und der Proband anschließend zur Sprachproduktion in einer anderen Sprache aufgefordert. Dabei wird dann darauf geachtet, ob er die gleichen Grammatik-Strukturen verwendet, die ihm davor angeboten worden waren.

Aufgaben in der Zweitsprache auf Grammatik-Strukturen in der Erstsprache zurück (Hartsuiker et al., 2004).

Durch die Grammatik-Verarbeitung in der spät erlernten Zweitsprache kam es neben der Aktivierung an der Grammatik-Verarbeitung der Erstsprache beteiligter Areale zur Aktivierung zusätzlicher Areale. Die Aktivierung zusätzlicher Areale durch die Grammatikverarbeitung in der spät erlernten Zweitsprache können anhand der vorliegenden Studien wie folgt erklärt werden:

In Verhaltensstudien wurde gezeigt, dass Kinder beim Zweitspracherwerb nach einem gewissen Alter in Bezug auf die Satzkonstruktion nicht denen beim Erstspracherwerb gleiche Stadien durchlaufen (Hakuta, 1987). Einige Autoren gehen davon aus, dass Grammatik nach einem bestimmten Alter nur noch über eine nicht grammatikalische Regelvermittlung (kein spezifisch linguistisches Wissen) erlernt werden kann, sondern auf pragmatischem und metalinguistischem Wissen aufbaut (Sanders, 2002).

Wenn bei der grammatikalischen Verarbeitung in einer nach einem bestimmten Zeitpunkt erlernten Zweitsprache auf andere Verarbeitungsstrategien zurückgegriffen werden muss, könnte dies eine mögliche Erklärung für die hier vorgestellten Ergebnisse sein, die eine deutliche Differenz in den Aktivierungsmustern zeigen, die durch die grammatikalische Verarbeitung in der spät erlernten Zweitsprache im Vergleich zur Erstsprache hervorgerufen werden.

7.2.3 Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Semantik-Verarbeitung

Wie schon in der Zusammenfassung der Ergebnisse zu Beginn der Diskussion festgestellt wurde, scheint der Einfluss des Alters beim Zweitspracherwerb auf die Semantikverarbeitung deutlich geringer zu sein als die Verarbeitung von grammatikalischem Material. Das semantische Material scheint stärker durch das Leistungsniveau beeinflusst zu werden. Dies zeigt sich eindeutig für die separat oder verstärkt aktivierten Areale im inferioren Frontallappen und im Temporallappen, die bei beiden Gruppen mit guten Sprachkenntnissen durch die Semantik-Verarbeitung in beiden Sprachen hervorgerufen wurden. Bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau konnten diese Areale nur für die Zweitsprache dargestellt werden.

Weiter kam es bei der Semantik-Verarbeitung beider Gruppen mit hohem Leistungsniveau im Vergleich der Sprachen zu einem signifikant größeren Aktivierungsmuster durch die deutsche Semantik-Kondition. Auffällig ist dabei, dass es durch die Verarbeitung deutscher

Grammatik bei keiner der beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau zu einer vermehrten Aktivierung kam, wie es für die Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau der Fall war. Als Grund für die unterschiedlichen Aktivierungsmuster, die durch die Verarbeitung von Semantik-Material bei den Gruppen mit hohem Leistungsniveau hervorgerufen wurden, soll hier die Möglichkeit des Alters bei (Zweit)spracherwerb erläutert werden. Als weitere mögliche Erklärungen sollen im Kapitel 14 das Leistungsniveau diskutiert werden.

7.2.3.1 Vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik

Weber-Fox und Neville fanden bei der Verarbeitung von semantischen Entscheidungsaufgaben zweier Sprachen eine Differenz bei der Gruppe mit Zweitspracherwerb nach dem elften Lebensjahr im Vergleich mit einer Gruppe monolingualer Probanden (Weber-Fox & Neville, 1996). Wenn also eine sensible Phase für den Semantik-Erwerb mit dem elften Lebensjahr endet, würde sie mit den hier beschriebenen Ergebnissen nicht klar erfasst werden, da zwei Probanden der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und guten Sprachkenntnissen mit sieben Jahren angefangen haben Deutsch als Zweitsprache zu erlernen, ein Proband mit vierzehn Jahren und zwei nach dem achtzehnten Lebensjahr. Da es aber auch bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb zu einer größeren Anzahl von aktivierten Arealen durch die deutsche Semantik-Kondition kam, kann diese Differenz nicht mit einer sensiblen Phase und auf diese Weise auch nicht mit dem Alter bei Spracherwerb begründet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Alter bei Zweitspracherwerb als Grund für das größere Aktivierungsmuster, das durch die Aktivierung mit semantischem Satzmaterial bei beiden Gruppen mit guten Sprachkenntnissen auftritt, ausgeschlossen werden kann.

Auf die Aktivierung dieser Areale soll im Kapitel 14 noch näher eingegangen werden.

Die Ergebnisse der Semantikverarbeitung sollen im folgenden Kapitel zum Leistungsniveau diskutiert werden.

7.2.4 Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die Sprachverarbeitung

7.2.4.1 Aktivierte Areale im rechten Frontal- und im linken Parietallappen

Neben den oben beschriebenen Unterschieden der Aktivierungsmuster durch die semantische Verarbeitung, kam es bei den Gruppen mit spätem Spracherwerb beim Vergleich der Sprachen miteinander bei beiden Sprachprozessen zu Aktivierungen im

rechten Frontal- und im linken Parietallappen durch die spät erlernte Zweitsprache. Diese wurden für die Gruppe mit parallelem Spracherwerb nicht dargestellt.

Rechter Frontallappen

Die Aktivierungen, die durch die spät erlernte Zweitsprache vermehrt im rechten Frontallappen auftraten, kommen wahrscheinlich durch die Einbeziehung von pragmatischen und paralinguistischen Aspekten der Sprache zustande (Paradis, 1997). In einer fMRT- Studie von Just und Carpenter stellten diese eine Aktivierung des rechten inferior-frontalen Gyrus durch eine Präsentation von Sätzen mit komplexeren Strukturen im Vergleich mit weniger komplexen dar (Just et al. 1996).

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Aktivierung des rechten inferioren Frontallappens bei den Gruppen mit spätem Spracherwerb zur Kompensation nicht vorhandener spezifischer Sprachfähigkeiten hervorgerufen wird. Da in der vorliegenden Studie ein gleichwertiges Leistungsniveau für beide Gruppen mit hohem Leistungsniveau angenommen wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Aktivierung dieser Region vom Alter beim Spracherwerb abhängig ist.

Linker Parietallappen

Aktivierungen im Gyrus angularis konnten in mehreren Studien im Zusammenhang mit Worterkennung und Satzinterpretation dargestellt werden (Menard et al. 1996; Moore et al. 1999; Chee, Tan et al., 1999). Auch die Beteiligung des Parietallappens an der phonologischen Verarbeitung konnte in mehreren Studien nachgewiesen werden (Fujimaki et al., 1999; Chee, 2000).

Im Hinblick auf die kortikale Organisation mehrerer Sprachen konnten Price und Kollegen nachweisen, dass der Parietallappen eine wichtige Rolle bei der Kontrolle von Sprachprozessen und bei der Mehrsprachigkeit insbesondere bei der Kontrolle der Sprachwahl spielt (Price et al., 1999). Auch Halsband konnte in einer Studie zeigen, dass die Aktivierung der Parietallappen beidseitig durch das Encodieren und Erinnern von Wortpaaren in einer spät erlernten Zweitsprache bei guten Sprachkenntnis hervorgerufen wird (Halsband et al., 2000).

Die in den vorliegenden Daten auftretende Aktivierung des linken Parietallappens bei den Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb ist somit vom Alter bei Zweitspracherwerb abhängig und ist an der Erkennung und Kontrolle der spät erlernten Zweitsprache beteiligt.

Aktivierungen extrakortikaler Strukturen, die durch das niedrige Leistungsniveau hervorgerufen wurden, sollen im nächsten Kapitel abgehandelt werden.

7.3 Leistungsniveau

7.3.1 Einfluss des Leistungsniveau auf die Grammatik-Verarbeitung

Im Kapitel über den Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation der Sprachverarbeitung wurde gezeigt, dass die Grammatik-Verarbeitung vor allem durch das Alter bei Spracherwerb beeinflusst ist. Eine Auswirkung des Leistungsniveaus spezifisch auf die Grammatik-Verarbeitung stellt sich in den hier präsentierten Daten nicht dar.

7.3.2 Einfluss des Leistungsniveaus auf die Semantikverarbeitung

7.3.2.1 Separat aktivierte Areale im linken Frontal- und Temporallappen

Die Semantikverarbeitung dagegen wurde deutlich durch das Leistungsniveau beeinflusst. Wie schon im Kapitel 13.3 erwähnt wurde, kam es für beide Gruppen mit hohem Leistungsniveau beim Vergleich der Semantikverarbeitung bei beiden Sprachen zu separat oder verstärkt aktivierten Arealen im linken Frontallappen und im linken Temporallappen. Für die Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau konnten separat oder verstärkt aktiviert Areale nur bei der Semantik-Verarbeitung in der Zweitsprache dargestellt werden. Im Vergleich mit Ruhe kam es bei allen drei Gruppen bei der Semantik-Verarbeitung in beiden Sprachen zu Aktivierungen in den klassischen Spracharealen im Frontal- und im Temporallappen und in anderen Regionen.

Illes und Kollegen (1999) konnten in einer fMRT-Studie zur semantischer Verarbeitung bei Erst- und Zweitsprache bei Probanden mit spätem Zweitspracherwerb (>13 Jahre) und hohem Leistungsniveau keine separaten oder verstärkt aktivierte Areale für eine der beiden Sprachen darstellen (Illes et al., 1999). Chee und Kollegen (1999) hingegen zeigten separat oder verstärkt aktivierte Areale im linken Frontallappen bei der Verarbeitung in der Zweitsprache bei Probanden mit frühem (<7 Jahre) und spätem (>13 Jahre) Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau (Chee et al., 1999).

In der Studie von Illes und Kollegen stellten sich keine Unterschied zwischen der semantischen Verarbeitung in der Erst- und der Zweitsprache dar, was den Ergebnissen der hier vorliegenden Daten entspricht und bestätigt, dass das Alter bei Zweitspracherwerb

keinen Einfluss auf die kortikale Strukturen hat, die an der Semantikverarbeitung beteiligt sind. Separat oder verstärkt aktivierte Areale in den klassischen Spracharealen, wie sie die hier vorgestellten Daten zeigen, wurden allerdings nicht gefunden. Eine Erklärung für die fehlende separate oder verstärkte Aktivierung von Arealen in den klassischen Spracharealen durch die Semantikverarbeitung liegt womöglich im Aktivierungsmaterial. Anders als in der hier vorgestellten Studie arbeiteten Illes und Kollegen mit semantischer Verarbeitung einzelner Worte und nicht mit der Verarbeitung semantischen Satzmaterials. Das Gleiche gilt für Chee und Kollegen. Diese konnten aber separat oder verstärkt aktivierte Areale im Frontallappen bei beiden untersuchten Gruppen darstellen. Allerdings traten die Aktivierungen beim Vergleich der Sprachen nur im Frontallappen und nur für die Zweitsprache auf.

Mit komplexerem aber nicht spezifisch semantischem Satzmaterial arbeiteten auch Perani und Kollegen, die bei Probanden mit frühem (<4 Jahre) und spätem (>11 Jahre) Spracherwerb und hohem Leistungsniveau separat oder verstärkt aktivierte Areale für beide Sprachen darstellen konnten. Diese Aktivierungen traten jedoch nicht in der linken Hemisphäre auf (Perani et al. 1998). Separat oder verstärkt aktivierte Areale im linken Frontal- und im linken Temporallappen konnten in einer fMRT-Studie von Kim und Kollegen gezeigt werden (Kim et al., 1997). In dieser Studie wurden Probanden mit frühem (ab der frühen Kindheit) und spätem Zweitspracherwerb (>10 Jahre) mit hohem Leistungsniveau bei Sprachproduktion untersucht. Separat oder verstärkt aktivierte Areale traten im Vergleich bei beiden Sprachen auf und konnten für beiden Gruppen dargestellt werden. Zu beachten ist, dass die Studie von Kim, ebenso wie die von Chee die hervorgerufenen Aktivierungen bei einzelnen Probanden betrachtet und keine Gruppenanalyse ist. Werden aber innerhalb einer Gruppen-Studie, wie es in den anderen hier aufgeführten Studien sowie den vorliegenden Daten der Fall ist, die Aktivierungen dieser Areale durch die Gruppenanalyse gemittelt, ist eine Darstellung von dicht beieinander liegenden separaten Aktivierungen nur schwer möglich. Das könnte erklären, warum in der Gruppen-Studie von Perani und Kollegen keine separat oder verstärkt aktivierten Areale fronto-temporal dargestellt werden konnten. Eine weitere Erklärung ist die Tatsache, dass die Aktivierungen durch PET dargestellt wurden, was die räumliche Auflösung bedeutend einschränkt. Zu dieser Erklärung kamen auch Halsband und Kollegen, die in einer PET-Studie im linken inferior frontalen Gyrus getrennte Areale durch die Sprachverarbeitung in der Erstsprache bei einer Gruppe mit spätem

Zweitspracherwerb (<12 Jahre) darstellen konnten, nicht jedoch für die spät erlernte Zweitsprache (Halsband et al. 2002). Auch führten sie den Umstand, dass es sich um eine Gruppen-Studie handelt, als einen möglichen Grund an.

In der hier vorgestellten Studie, bei der es sich auch um eine Gruppen-Studie handelt, kommt es aber dennoch durch die Verarbeitung des semantische Satzmaterial beider Sprachen zu separat oder verstärkt aktivierten Arealen bei beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau. Das liegt vermutlich an der besseren räumlichen Auflösung, die durch die fMRT gegeben ist.

Die Existenz von Arealen in frontalen und temporo-parietalen Hirnregionen, die für eine Sprache oder eine Sprachteilfunktion spezifische sind, konnte durch intraoperative Stimulation bestätigt werden. Dabei zeigte sich, dass bei bilingualen Patienten in temporo-parietalen wie auch in frontalen Arealen sowohl gemeinsame als auch getrennte kortikale Areale für beide Sprachen vorhanden sind (Roux et al., 2002).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es im linken Frontal- und Temporallappen Areale gibt, die separat oder verstärkt durch die Verarbeitung von komplexeren semantischen Aufgaben in nur einer Sprache aktiviert werden. Anhand der hier vorliegenden Daten konnte gezeigt werden, dass diese Aktivierungen vom Leistungsniveau abhängig sind.

Im folgenden Abschnitt soll eine mögliche Erklärung für das Auftreten separat oder verstärkt aktivierter Areale im linken Frontal- und Temporallappen bei den Gruppen mit hohem Leistungsniveau gegeben werden.

Gemeinsame oder getrennte Lexika

In den späten 70er Jahren wurde die Theorie entwickelt, dass sich in der ersten Phase des parallelen Spracherwerbs (bis zum 3.Lebensjahr) ein Gemisch aus beiden Sprachen als aktives Lexikon erworben wird. In der zweiten Phase (bis zum maximal 5.Lebensjahr) erlernt das Kind immer mehr äquivalente Wörter aus beiden Sprachen und es kommt zu einer Trennung der Lexika (Volterra & Taeschner, 1978; Mehlem, 1998). Ähnliches gilt für den späten Zweitspracherwerb. Im Bezug auf das Erlernen von Worten beim späten Zweitspracherwerb wird davon ausgegangen, dass sich das Vokabular der Zweitsprache auf dem der Erstsprache aufbaut, von diesem zeitweilig abhängig ist und erst im Verlauf des Zweitspracherwerbs von der Erstsprache getrennt und direkt mit der Bedeutung des Wortes verbunden wird (Snow & Hoefnagel-Hohle, 1978). Das bedeutet, dass beim parallelen

Spracherwerb sowie beim späten Zweitspracherwerb vorerst gemeinsame Lexika entstehen, die im Verlauf des Spracherwerbs voneinander getrennt werden. Kognitionsstudien bei erwachsenen Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und guten Sprachkenntnissen, die mit „repetition priming“ arbeiten, haben eine Trennung der Sprachen auf der Ebene des Lexikons bestätigt (Beauvillain, 1992; Oksaar, 2003).

Es stellt sich daher die Frage, ob die psycholinguistisch beschriebene Trennung der Lexika einzelner Sprachen auch auf kortikaler Ebene stattfindet und ob getrennte Areale für Lexika unterschiedlicher Sprachen vorhanden sind. In der Studie von Halsband und Kollegen konnte gezeigt werden, dass es im inferioren Frontallappen getrennte Areale zur Verarbeitung von Worten für die einzelnen Sprachen gibt (Halsband et al., 2002). Weitere Studien zeigten durch die Sprachen separat aktivierte Areale im linken Frontal- und Temporallappen (Roux et al., 2002; Kim et al., 1997) und die hier vorliegenden Daten stellen separat oder verstärkt durch die Semantikverarbeitung einzelnen Sprachen aktivierten Arealen in diesen Regionen dar.

Die Theorie, dass sich erst im Verlauf des Spracherwerbs getrennte Lexika für die einzelnen Sprachen bilden, kann durch die hier vorliegenden Daten gestützt werden. Unter der Annahme, dass es sich bei den separat aktivierten Arealen um getrennte Lexika handelt, wird die oben genannte Theorie durch die Tatsache bestätigt, dass diese Areale bei der Gruppe mit geringen Sprachkenntnissen nicht auftreten, obwohl es beim Vergleich gegen Ruhe durch die Semantikverarbeitung in beiden Sprachen zu Aktivierungen in diesen Bereichen kommt. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die im Verlauf des Spracherwerbs psycholinguistisch beschriebene Trennung der Lexika einzelner Sprachen auch auf kortikaler Ebene stattfindet.

Dass die in dieser Studie für die Sprachen separat aktivierten Areale im linken frontal- und Temporallappen wirklich getrennte Lexika repräsentieren, ist sehr wahrscheinlich, kann durch diese Studie aber nicht nachgewiesen werden. Sicher ist, dass in den beschriebenen Regionen durch die Verarbeitung semantischen Aktivierungsmaterials unterschiedlicher Sprachen separate Aktivierungen hervorgerufen werden konnten und dass diese durch das Leistungsniveau beeinflusst werden.

7.3.2.2 Vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik

Da das Alter bei Spracherwerb als Ursache für das größere Aktivierungsmuster, das durch das deutsche semantische Satzmaterial hervorgerufen wird, im letzten Abschnitt

ausgeschlossen wurde, soll nun das Leistungsniveau als möglicher Grund für die Differenz zwischen den Aktivierungsmustern der beiden Sprachen diskutiert werden.

In den hier präsentierten Daten zeigt sich bei allen drei untersuchten Gruppen eine vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutschen Semantikmaterials im Vergleich mit italienischem Semantikmaterial. Die vermehrte Aktivierung tritt somit auch bei zwei Gruppen mit hohem Leistungsniveau auf. Diese vermehrte Aktivierung wird bei beiden Gruppen durch die Verarbeitung der deutschen Semantikaufgaben hervorgerufen, nicht aber durch die Verarbeitung von deutschem Grammatikmaterial.

Auch in den Studien von Chee et al. und Perani et al. kommt es zu vermehrter Aktivierung durch eine der Sprachen bei Gruppen mit parallelem Spracherwerb (Perani et al., 1998; Chee et al., 2000).

Chee erklärte das Auftreten der vermehrten Aktivierungen durch ein niedriges Leistungsniveau für spezifische Verarbeitungsprozesse. Die in dieser Studie untersuchte Probanden-Gruppe besteht aus 5 Probanden. 3 dieser Probanden gaben Italienisch als „Erstsprache“ an, zwei Deutsch. Drei Probanden sind in Italien aufgewachsen, zwei in Deutschland (nicht identische mit denen, die Italienisch als „Erstsprache“ angeben). Somit kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Gruppe ein gleichwertiges Leistungsniveau für beide Sprachen vorliegt. Es ist allerdings vorstellbar, dass für einzelne Probanden der Gruppe mit parallelem Spracherwerb Deutsch die schwächere Sprache ist, was sich vor allem auf die Verarbeitung semantischen Materials auswirken könnte. Da die Probanden-Gruppen dieser Studie mit 5-6 Probanden relativ klein sind, ist ein verhältnismäßig starker Einfluss durch die Aktivierungsmuster einzelner Probanden auf das gemittelte Aktivierungsmuster der Gruppe denkbar. Das könnte eine vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik erklären. Dabei ist es möglich, dass sich das niedrigere Leistungsniveau nur auf die Aktivierung auswirkt, eine vermehrte Aktivierung jedoch zu einem der dominanteren Sprache gleichwertigen Verarbeitungsniveau führen könnte. Somit würde sich das niedrigere Leistungsniveau nicht auf das Ergebnis des durchgeführten Sprachtests niederschlagen. Bei der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau gaben alle Probanden Italienisch als Erstsprache an und es ist anzunehmen, dass es sich bei Deutsch bei allen Probanden dieser Gruppe um die schwächere Sprache handelt.

Es ist somit denkbar, dass die vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutschen Semantik-Materials dadurch begründet werden muss, dass es sich bei Deutsch für einen Teil der Probanden mit hohem Leistungsniveau um die schwächere Sprache handelt.

In dem folgenden Abschnitt soll näher auf die Funktion der in den hier vorgestellten Daten durch das deutsche Semantik-Material separat aktivierten Areale in der linken anterioren Insel, im Precuneus und im Gyrus fusiformis eingegangen werden.

Insel (BA 13)

Bei beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau stellt sich in den hier vorgestellten Daten eine separate oder stärkere Aktivierung der anterioren Insel durch die deutsche Semantik-Verarbeitung dar (bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb links, bei der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb rechts).

Die Aktivierung der anterioren Insel, vorwiegend der linken Hemisphäre, wurde in zahlreichen Studien im Zusammenhang mit der motorischen Planung (linke anteriore Insel: Dronkers, 1996), der Artikulation bei Sprachproduktion (linke anteriore Insel: Wise et al., 1999), phonologischer (linke anteriore Insel: Fujimaki et al., 2001) und semantischer Verarbeitung (linke und rechte anteriore Insel: Abdullaev et al., 1998; Kuperberg et al., 2000) beschrieben. Eine vermehrte oder separate Aktivierung für nur eine der beiden Sprachen in der anterioren Insel tritt in keiner anderen der im Rahmen der Diskussion aufgeführten Studien auf.

In den hier präsentierten Daten kann die Aktivierung der anterioren Insel mit der Aktivierung durch semantische Verarbeitung oder motorische oder phonologische Sprachverarbeitung kommen. Warum diese Aktivierung nur oder verstärkt durch die Verarbeitung deutschen Semantikmaterials hervorgerufen wurde, kann hier anhand der hier aufgeführten Studien nicht geklärt werden.

Precuneus (BA 7)

Die Aktivierung des Precuneus wurde nicht nur von Chee und Perani, sondern auch von McDermott bei phonologischer oder semantischer Verarbeitung beobachtet (Perani, 1998; Chee, Tan CT et al., 1999; Chee, Caplan et al., 1999; Chee, 2000; McDermott, 2003).

Bei den vorliegenden Daten stellte sich die Aktivierung des Precuneus für die Gruppe mit parallelem Spracherwerb im rechten, für die Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau im linken Precuneus dar.

Auch bei den Studien von Perani und Chee zeigte sich eine Aktivierung des linken Precuneus bei Probanden mit parallelem Spracherwerb durch eine früh erlernte Sprache. Bei beiden Studien gaben die Probanden die Sprache als schwächere oder weniger verwendete Sprache an (Perani et al. 1998, Chee et al. 2000). In einer Studie von Halsband zeigte sich eine Aktivierung des Precuneus bilateral durch die Verarbeitung sowohl der Erstsprache als auch durch die spät erlernten Zweitsprache (Halsband et al., 2002).

Weshalb es bei den hier vorliegenden Daten nur durch die Verarbeitung des deutschen Semantik-Materials (für die Gruppe mit spätem Spracherwerb auch durch die deutsche Grammatik-Kondition) kam, kann durch die hier diskutierten Studien nicht geklärt werden.

Gyrus fusiformis (BA 37)

Der linke Gyrus fusiformis wurde als, vor allem bei semantischer Verarbeitung aktiviertes Areal von McDermott und Abdullaev beschrieben (Abdullaev et al., 1998; McDermott et al., 2003). Auch in der Studie von Chee konnte eine Aktivierung des linken Gyrus fusiformis dargestellt werden. Diese zeigte sich ausschließlich bei der Gruppe mit frühem Spracherwerb, hervorgerufen durch die Verarbeitung der als schwächer beschriebenen Sprache (Chee et al. 2000). Zu einer Aktivierung des rechten Gyrus fusiformis wie in den vorliegenden Daten bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb durch die deutsche Semantik-Kondition kam es in den oben aufgeführten Studien nicht.

Die durch die Verarbeitung deutscher Semantik-Aufgaben hervorgerufenen Areale in der anterioren Insel, im Precuneus und im Gyrus fusiformis wurden auch in anderen Studien zur Verarbeitung von semantischen Satzmaterial, bzw. beim Erkennen und Erinnern von Worten beschrieben. Warum aber diese Aktivierungen verstärkt oder separat durch die Verarbeitung deutscher Semantik hervorgerufen werden, kann nicht sicher geklärt werden. Es kann aber vermutet werden, dass die vermehrte Aktivierung dadurch entsteht, dass es sich bei Deutsch um die schwächere Sprache handelt. Für die Gruppe mit parallelem Spracherwerb könnte dies durch die geringe Probandenzahl und den relativ großen Einfluss der Aktivierungen einzelner Probanden erklärt werden. Bei der Gruppe mit hohem Leistungsniveau und spätem Spracherwerb ist mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass es sich bei Deutsch um die schwächere Sprache handelt.

Bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau kam es beim Vergleich der durch die Semantik-Verarbeitung beider Sprachen zur Aktivierung im linken Gyrus fusiformis. Im

folgenden Abschnitt soll kurz auf die Funktion des Gyrus fusiformis bei der Sprachverarbeitung eingegangen werden.

7.3.2.3 Aktivierung des Gyrus fusiformis

Durch die Verarbeitung von italienischem Semantikmaterial im direkten Vergleich kam es bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau zur separaten oder verstärkten Aktivierung des linken Gyrus fusiformis.

Wie oben beschrieben wird der Gyrus fusiformis vor allem durch visuell präsentierte orthographisches und semantisches Material aktiviert (Moore et al., 1999; Fujimaki et al., 1999; Abdullaev et al., 1998; McDermott et al., 2003).

Eine separate oder verstärkte Aktivierung des linken Gyrus fusiformis trat bei der Verarbeitung von italienischem Semantikmaterial bei den Gruppen mit hohem Leistungsniveau nicht auf. Es ist vorstellbar, dass Regionen im Gyrus fusiformis durch die Semantik-Kondition in der Erstsprache zur semantischen Verarbeitung herangezogen werden, die durch die nur unvollständig beherrschte Zweitsprache nicht genutzt werden können.

7.3.3 Einfluss des Leistungsniveaus auf die Sprachverarbeitung

Bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau kam es bei der Verarbeitung von Grammatik und Semantik in der spät erlernten Zweitsprache in gleichem Maße zu deutlich vermehrter Aktivierung im Vergleich mit der Erstsprache. Der Zusammenhang von niedrigem Leistungsniveau und vermehrter Aktivierung soll in diesem Abschnitt erklärt werden.

7.3.3.1 Vermehrte Aktivierung durch niedriges Leistungsniveau

Komplexeres, unbekanntes Aktivierungsmaterial zu stärkeren Aktivierungen und zur Aktivierung größerer Areale sowie zur stärkeren Einbeziehung der rechten Hemisphäre (Chee et al., 2000). Zu diesem Ergebnis kam auch Fletcher (Fletcher et al., 2000).

Abhängigkeit des BOLD-Signals vom Leistungsniveau

Eine Abhängigkeit der Größe der BOLD-Signal-Änderung bestimmter Regionen vom Leistungsniveau für die Zweitsprache der Probanden wurde in mehreren Untersuchungen nachgewiesen (Yetkin et al. 1996; Rees et al. 2000; Chee et al. 2000). Vor allem im Bereich des Parietallappens scheint sich ein niedriges Leistungsniveau durch ein größeres BOLD-Signal darzustellen.

Auch im linken inferioren Frontallappen kommt es durch ein niedrigeres Leistungsniveau zu einer verstärkten Aktivierung. Zusätzlich kommt es in der rechten Hirnhälfte zur Aktivierung dieser Region (Fletcher et al., 2000).

Hier sei noch auf eine Studie von Price hingewiesen, die in einer PET-Untersuchung beim switching (Wechsel zwischen den Sprachen innerhalb eines Satzes/Gesprächs) gegen Übersetzen oder Lesen ohne Sprachwechsel aktivierte Areale im linken inferioren Frontallappen und im Parietallappen zeigen konnten. In Anlehnung an die Studie von Price ist es möglich zu der Schlussfolgerung zu kommen, dass die Aktivierung des Parietallappens, die für beide Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb (LAHP und LALP) auftritt, die Erkennung und Verarbeitung der Zweitsprache unterstützt (Price et al 1999). Die verstärkte Aktivierung und die Aktivierung größerer Areale kann also auf den höheren Schwierigkeitsgrad, hier in Form der Verarbeitung von Satzmaterial in einer weniger gut beherrschten Sprache, zurückgeführt werden.

7.3.3.2 Aktivierung von extrakortikalen Strukturen

Anders als bei den Gruppen mit hohem Leistungsniveau kam es bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau durch die Aktivierung mit deutschem Satzmaterial zur Aktivierung extrakortikalen Strukturen. Mehrere Studien beschreiben die Beteiligung des linkem Putamen und des Nucleus caudatus an der Artikulation oder der Kontrolle zur Auswahl und dem Wechsel der Sprachen (Abutalebi et al. 2000; Papathanassiou, 2000; Price et al. 1999; Wise et al. 1999; Fabbro et al., 1995; Klein et al., 1995 und 1994). Der Thalamus hingegen wurde mit Gedächtnisfunktionen und dem räumlichen Sehen in Zusammenhang gebracht (Radanovic et al., 2003).

Bei den Daten dieser Arbeit fällt auf, dass es bei dem vorgegebenen Threshold allein bei der Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb und geringen Sprachkenntnissen zu einer Aktivierung der subkortikalen Strukturen durch die nur begrenzt beherrschte Zweitsprache kam. Das lässt vermuten, dass die Beteiligung dieser Strukturen an der Verarbeitung der Zweitsprache vom niedrigen Leistungsniveau abhängig ist.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Folgende Schlussfolgerungen können aus dieser Arbeit gezogen werden:

Wie auf Grund der in den neurolinguistischen Grundlagen vorgestellten Studien angenommen, zeigte sich eine deutliche Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikale Organisation der Sprachverarbeitung mit unterschiedlichem Einfluss auf die Verarbeitung von Grammatik und Semantik.

Für die Verarbeitung der Grammatik konnte gezeigt werden, dass in einer spät erlernten Zweitsprache links frontal und temporal separate oder verstärkte Aktivierungen hervorgerufen werden, die sich bei der Grammatikverarbeitung in der Erstsprache, bzw. bei parallel erlernten Sprachen nicht darstellen. Diese Areale sind somit in Abhängigkeit vom Alter bei Zweitspracherwerb aktiviert und sind unabhängig vom Leistungsniveau, da sie bei beiden Gruppen mit spätem Spracherwerb bei der Grammatik-Verarbeitung aktiviert waren. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen psycholinguistischer Studien überein. Diese zeigten, dass sich die Grammatik für unterschiedliche Sprachen beim parallelen Spracherwerb in einem gemeinsamen Grammatiksystem ausbildet, und dass sich die Grammatik später erworbener Sprachen auf dem schon vorhandenen Grammatiksystem der Erstsprache(n) aufbaut (Hartsuiker et al., 2004; Sanders, 2002).

Die Auswirkung des Alters bei Spracherwerb auf die kortikale Organisation der Semantik-Verarbeitung ist deutlich geringer ausgeprägt. Hier scheint das Leistungsniveau einen größeren Einfluss zu haben. Bei den Gruppen mit hohem Leistungsniveau führt die Verarbeitung von Semantik bei beiden Sprachen zu separat oder verstärkten Aktivierungen in linkshemisphärischen frontalen und temporalen Regionen. Diese treten bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau nicht auf. Die psycholinguistische Theorie, dass sich bei guten Sprachkenntnissen separate Lexika ausbilden, kann diese Tatsache erklären (Snow & Hoefnagel-Hohle, 1978). Nicht sicher geklärt, aber vermutet werden kann, dass die vermehrte Aktivierung durch die Verarbeitung deutscher Semantik bei beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau darauf zurückzuführen ist, dass es sich bei Deutsch um die „schwächere“ Sprache handelt, die vermehrte Aktivierung somit vom Leistungsniveau abhängig ist. Auch die deutlich stärkeren Aktivierungen von an der Sprachverarbeitung beteiligten Arealen der rechten Hemisphäre sowie die Aktivierung subkortikaler Strukturen bei der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau lassen sich, da sie nur bei dieser Gruppe

aufzutreten, auf das Leistungsniveau zurückzuführen. Das konnte durch andere Studien bestätigt werden (Chee et al., 2000; Fletcher, 2000). Dabei handelt es sich um die Aktivierung nicht sprachspezifischer Areale (Paradis, 1997). In anderen Studien konnte die Rolle der subkortikalen Strukturen an der Artikulation einer spät erlernten Zweitsprache (Klein et al., 1994) und der Kontrolle zur Auswahl und dem Wechsel der Sprachen nachgewiesen werden (Price et al. 1999; Fabbro et al. 1995).

Die bei der Verarbeitung beider Sprachprozesse, d.h. der Grammatik und der Semantik, in der Zweitsprache separat oder verstärkt aktivierten Areale in der rechten Frontalregion und im linken Parietallappen bei den Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb sind ebenfalls durch das Alter bei Zweitspracherwerb beeinflusst, da diese bei der Gruppe mit parallelem Spracherwerb nicht aktiviert werden. In anderen Studien konnte gezeigt werden, dass die rechte Frontalregion mit zunehmender Komplexität der Aufgabenstellung (Just et al. 1996) aktiviert wird. Der Parietallappen wird durch die Verarbeitung einer spät erlernten Fremdsprache aktiviert und spielt eine wichtige Rolle bei der Mehrsprachigkeit (Halsband, 2000, Price et al., 1999).

Abschließend lässt sich sagen, dass mit dieser Studie gezeigt werden konnte, dass sich das Alter bei Zweitspracherwerb sowie das Leistungsniveau auf die kortikale Organisation der Sprachprozesse Grammatik und Semantik auswirken. Der Einfluss der beiden Faktoren auf die Verarbeitung von Grammatik und Semantik ist unterschiedlich. Das Alter bei Spracherwerb zeigt dabei einen besonders großen Einfluss auf die grammatikalische Verarbeitung. Ebenso abhängig vom Alter bei Spracherwerb ist die verstärkte Aktivierung rechter, frontaler Regionen und des linken sowie rechten Parietallappens. Das Leistungsniveau beeinflusst vor allem die kortikale Organisation der Prozesse, die an der Verarbeitung semantischer Aufgaben beteiligt sind. Weiter konnte eine deutliche Auswirkung des Leistungsniveaus auf die Aktivierung der rechten Hemisphäre und subkortikaler Strukturen dargestellt werden.

Es zeigt sich anhand dieser Studie, wie wichtig es ist, den Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb und den des Leistungsniveaus auf die Verarbeitung von Grammatik und Semantik separat zu untersuchen. Weiter wird deutlich, dass eine sehr genaue Prüfung des Leistungsniveaus und die höchstmögliche Homogenität der Probandengruppen, des Stimulusmaterials und der Meßmethoden besonders in dem Gebiet der Sprachforschung

eine unbedingte Voraussetzung ist, um genaue Aussagen über den Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb und des Leistungsniveaus machen zu können.

9 ZUSAMMENFASSUNG

In den vergangenen Jahrzehnten ist das Interesse der kognitiven Neurowissenschaft an der Zweisprachigkeit gewachsen. Fragen zum Einfluss des Alters bei Zweitspracherwerb (Age of Acquisition) und des Leistungsniveaus (Proficiency Level) auf die kortikale Struktur der Sprachverarbeitung standen dabei bisher im Vordergrund. In bildgebenden Studien wurde dabei eine eventuell unterschiedliche Auswirkung auf die einzelnen Sprachprozesse Grammatik und Semantik ausser Acht gelassen. In dieser Arbeit wurde die Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerb sowie des Leistungsniveaus auf die neuronale Verarbeitung von Grammatik- und Semantikaufgaben dargestellt. Mit der funktionellen Magnetresonanztomographie wurden zweisprachige Probanden (Italienisch-Deutsch) mit unterschiedlichem Alter bei Zweitspracherwerb und unterschiedlichem Leistungsniveau bei der Verarbeitung von semantischem und grammatikalischem Satzmaterial untersucht. Es zeigte sich deutlich die Auswirkung des Alters bei Zweitspracherwerb auf die kortikalen Prozesse, besonders während grammatikalischer Verarbeitung. Eine Auswirkung des Leistungsniveaus auf die neuronale Organisation zeigte sich vor allem bei der Verarbeitung der Semantik. Anhand der Ergebnisse dieser Studie konnte somit die Annahme bestätigt werden, dass die Verarbeitung einzelner Sprachprozesse, hier Grammatik und Semantik, durch das Alter bei Spracherwerb und das Leistungsniveau unterschiedlich beeinflusst werden.

Schlagwörter: Zweisprachigkeit, fMRT, Grammatik, Semantik

10 ABSTRACT

During the last decades cognitive neuroscience got more and more interested in the topic of bilingualism. The influence of Age of Acquisition and Proficiency Level became the question of most interest. Neuroimaging studies didn't consider an eventually different influence of the Age of Acquisition and the Proficiency Level on grammatical and semantical processes. This study investigated the influence of the Age of Acquisition and the Proficiency Level on the neural correlates of grammatical and semantic processes separately. Functional magnetic resonance imaging was used to investigate neural activity of bilinguals (Italian-German) with different Age of Acquisition and Proficiency Level while processing grammatical and semantical judgments. While the patterns of cortical activity for grammatical processes were considerably influenced by the Age of Acquisition, patterns of cortical activity for semantical processes were more influenced by the proficiency level. With the results of this study the assumption that Age of Acquisition and the Proficiency Level have different influence on grammatical and semantical processes could be confirmed.

Keywords: Bilingualism, fMRI, grammar, semantics

11 LITERATURHINWEISE

1. Abdullaev YG, Posner M: Event-related brain potential imaging of semantic encoding during processing single words. *Neuroimage*, 1998; 71-13
2. Abutalebi J, Miozzo A, Cappa SF: Do subcortical structures control 'language selection' in polyglots? Evidence from pathological language mixing. *Neurocase*, 2000; 6:51-56
3. Ajuriaguerra J de: Language et dominance cérébrale. *J Français d'Oto-Rhino-Laryngol*, 1957; 6:489-499
4. Albert ML, Obler LK: *The bilingual brain*. New York: Academic Press, 1978
5. Ashburner J, Friston KJ: Spatial transformation of images. Hrsg: Frackowiak RSJ, Friston KJ, Frith CD, Dolan, RJ, Mazziotta JC. *Human Brain Function*, San Diego: Academic Press, 1997
6. Bates S, Thal D, Jankowski JS,: Early language development and its neural correlates. Hrsg: Segalowitz SJ, Rapin J. *Handbook of Neuropsychology*. Band 7. Amsterdam: Elsevier, 1992; 69-110
7. Beauvillain C: Orthographic and lexical constraints in bilingual word recognition. Hrsg: Harris RJ. *Cognitiv processing in bilinguals*. 1992, Amsterdam: Elsevier, 221-235
8. Bialystok E, Miller, B: The problem of age in second-language acquisition: Influences from language, structure, and task. *Bilingualism: Language and Cognition*. 1999; 2:127-145
9. Bloomfield L: *Language*. New York: Holt, 1933
10. Broca P: Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé; suivies d'une observation d'aphemie. *Bull-Soc-Anat-Paris*, 1861; 6:330-357
11. Brodmann, K.: *Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in den Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*. Leipzig: Johann Ambrosius Berth Verlag, 1909
12. Chee MWL: Relative language proficiency modulates BOLD signal change when bilinguals perform semantic judgments. *NeuroImage*, 2000; 13:1155-1163
13. Chee MWL, Caplan D, Soon CS et al.: Processing of visually presented sentences in Mandarin and English studied with fMRI. *Neuron*, 1999; 23:127-137
14. Chee MWL, Tan EWL, Thiel T: Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 1999; 19:3050-3056
15. Cooper RL: *Design of bilingualism*. Hrsg.: Fishman JA, Cooper RL, MA R. *Bilingualism in the barrio*. Bloomington Indiana: University Press, 1971
16. Chomsky N: *Syntactic structures*. The Hague Paris: Mouton, 1957
17. Cummins J: The influence of bilingualism on cognitive growth: A synthesis of research findings and explanatory hypotheses. *Working papers on bilingualism*. 1976; 9:1-43
18. Dehaene S, Dupoux E, Mehler J et al.: Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *Neuroreport*, 1997; 8:3809-3815
19. Dennis M, Whitaker HA: Hemispheric equipotentiality and language acquisition. Hrsg.: Segalowitz SJ. *Language development and neurological theory*. New York: Academic Press, 1977

20. Dopke S: Competing language structures: the acquisition of verb placement by bilingual German-English children. *Band J Child Lang.* 1998; 25(3):555-84
21. Dronkers NF: A new brain region for speech articulation. *Nature*, 1996; 14, 384(6605):159-161
22. Fabbro F, Paradis M: Differential impairments in four multilingual patients with subcortical lesions. Hrsg.: Paradis M. *Aspects of bilingual aphasia.* New York: Elsevier Science; 1995: 139-76
23. Fabbro F, Skrap M, Aglioti S: Pathological switching between languages following frontal lesion in a bilingual patient. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 2000; 68:650-652
24. Fishman JA: *Advances in the sociology of language.* The Hague: Mouton, 1971
25. Flege, JE, Munro MJ, MacKay IRA: Effects of age of second language learning on the production of English consonants. *Speech Communication*, 1995; 1:61-26
26. Fletcher PC, Shallice T, Dolan RJ "Sculpting and Space" - An account of left prefrontal : activation at encoding. *NeuroImage*, 2000; 12:404-417
27. Fox PT, Raichle ME, Mintun MA et al.: Nonoxidative glucose consumption during focal physiologic neural activity. *Science*, 1988; 241:1140-1144
28. Frege G: Über Sinn und Bedeutung. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 1892; C:25-50
29. Friston KJ, Ashburner J, Frith CD et al.: Spatial registration and normalisation of images. *Human Brain Mapping*, 1995; 2:165-189
30. Friston KJ, Williams S, Howard R, et al.: Movement-related effects in fMRI time-series. *Magn Reson Med*, 1996; 35(3):346-355
31. Fujimaki N, Niyauchi S, Putz B et al.: Functional magnetic resonance of neuronal activity related to orthographic, phonological, and lexico-semantic judgments of visually presented characters and words. *Hum Brain Mapp*, 1999; 8(1):44-59
32. Genesee F: Early bilingual development: one language or two. *Journal of Child Language*, 1989; 16:161-179
33. Genesee F: Bilingual children talking with monolingual adults: A study of bilingual communicative competence. *Applied Psycholinguistics*, 1996; 17:427-441
34. Gillis M: The acquisition of the English verbal system by two Japanese children in a natural setting. McGill University, Unpublished Master Thesis, 1975
35. Goebel R, Khorram-Sefat D, Muckli L et al.: The constructive nature of vision: direct evidence from functional magnetic resonance imaging studies of apparent motion and motion imagery. *Eur J Neurosci*, 1998; 10(5):1563-1573
36. Gordon N: The acquisition of a second language. *European Journal of Paediatric Neurology*, 2000; 4:3-7
37. Grosjean F: The bilingual's language modes. Hrsg.: Nicol JL. *One Mind, two languages. Bilingual language processing.* Oxford 2001: 1-25
38. Hakuta K: The second-language learner in the context of the study of language acquisition. Hrsg.: Homel P, Palij M, Aaronsen D. *Childhood bilingualism: aspects of linguistic, cognitive and social development.* Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Association, 1987

39. Halsband U, Krause BJ, Sipila H et al.: PET studies on the memory processing of word pairs in bilingual Finnish-English subjects. *Behav Brain Res*, 2002; *132(1)*:47-57
40. Hartsuiker RJ, Pickering MJ, Veltkamp E: Is syntax separate or shared between languages? *Psychol Science*, 2004; *15 (6)*:409-14
41. Heeschen C, Jurgens R: Pragmatic, semantic and syntactic factors influencing ear differences in dichotic listening. *Cortex*, 1977; *13*:74-84
42. Huber P, Gutbrod K, Ozdoba C et al.: Aphasia research and speech localization in the brain. *Schweiz Med Wochenschr*, 2000; *130(3)*:49-59
43. Illes J, Francis WS, Desmond JE et al.: Convergent cortical representation of semantic processing in bilinguals. *Brain-Lang*, 1999; *70*:347-363
44. Jackson JH: Clinical remarks on cases of defects of expression (by words, writing, songs etc.). *Lancet*, 1864; *1*:604-605
45. Johnson JS, Newport EL: Critical period effects in second language learning: the influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognit Psychol*, 1989; *21(1)*:60-99
46. Johnson JS, Newport EL: Critical periods effects on universal properties of language: the status of subadjacency in the acquisition of a second language. *Cognition*, 1991; *39(3)*:215-58
47. Juan-Garau M, Perez-Vidal C: Mixing and pragmatic parental strategies in early bilingual acquisition. *J Child Lang*, 2001; *28(1)*:59-86
48. Just M, Carpenter P, Keller et al.: Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science*, 1996; *247*:114-116
49. Kegel G: Entwicklung von Sprache und Kognition, Internet-Publikation: http://www.psycholinguistik.uni-muenchen.de/publ/entw_sprach_kogn.html
50. Khedr EM, Hamed E, Said A et al.: Handedness and language cerebral lateralization. *Eur J Appl Physiol*, 2002; *87(4-5)*:468-73
51. Kim KH, Relkin NR, Lee et al.: Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 1997; *388*:171-174
52. Kim SG, Ugurbil K: Comparison of Blood oxygenation and cerebral Blood Flow. Effects in fMRI: Estimation of Relative Oxygen Consumption Change. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1997; *38*:59-65
53. Kinsbourne M: The ontogeny of cerebral dominance. *Ann NY Acad Sci*, 1975; *263*:144-150
54. Klein D, Milner B, Zatorre RJ et al.: Cerebral organization in bilinguals: a PET study of Chinese-English verb generation. *Neuroreport*, 1999; *10(13)*:2841-2846
55. Klein D, Zatorre RJ, Milner B et al.: The neuronal substrates of bilingual language processing: evidence from positron emission tomography. Hrsg.: Paradis M. *Aspects of bilingual aphasia*. Oxford: Pergamon Press 1995: 23-36
56. Klein D, Zatorre RJ, Milner B et al.: Left putaminal activation when speaking a second language: evidence from PET. *Neuroreport*, 1994; *5*:95-97
57. Kuhl PK, Williams KA, Lacerda F et al.: Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science* 1992; *255*:606-608
58. Kuperberg GR, McGuire PK: Common and distinct neural Substrates for pragmatic,

- semantic, and syntactic processing of spoken sentences: an fMRI study. *Journal of cognitive neuroscience*, 2000; *122*:321-341
59. Lenneberg EH: *Biological foundations of language*. New York: Wiley, 1967
 60. Lenneberg EH: On explaining language. *Science*, 1969 *164*:635-643
 61. Luke KK, Liu HL, Wai YY et al.: Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Hum Brain Mapp*, 2002; *16*(3):133-145
 62. Maybury RI: First-language acquisition after childhood differs from second-language acquisition: the case of American Sign Language. *J Speech Hearing Res*, 1993; *36*:1258-1270
 63. McDermott KB, Petersen SE, Watson JM et al.: A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 2003; *41*(3):293-303
 64. McLaughlin B: *Second-language acquisition in childhood*. Hrsg.: Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1978
 65. Mehlem U: *Zweisprachigkeit marokkanischer Kinder in Deutschland*. Frankfurt/M: Lang, 1998
 66. Mehler J, Lambert G, Jusczyk PW et al.: Discrimination of the mother tongue by newborn infants. *C R Acad Sci III*, 1968; *303*(15):637-640
 67. Meisel JM: *The Bilingual Child*. Hrsg.: Bhatia TK, Ritchie WC. *The Handbook of Bilingualism*. Malden (MA) 2004: 91-113
 68. Menard MT, Kosslyn SM, Thompson WL et al.: Encoding words and pictures: a positron emission tomography study. *Neuropsychologia*, 1996; *34*(3):185-194
 69. Moore CJ, Price CJ: Three distinct ventral occipito-temporal regions for reading and object recognition. *Neuroimage* 1999; *10*(2):181-192
 70. Ogawa S, Lee TM, Nayal AS, Glynn P: Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic-Resonance-in-Medicin*, 1990a; *14*:68-78
 71. Ogawa S, Lee TM, Tank DW: Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc-Natl-Acad-Sci-USA*, 1990b; *87*:9868-9872
 72. Ogawa S, Menon R, Tank DW et al.: Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging: A comparison of signal characteristics with a biophysical model. *Biophysical Journal*, 1993; *64*:803-812
 73. Ogawa S, Tank DW, Menon R et al.: Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proc-Natl-Acad-Sci-USA*, 1992; *89*:5951-5955
 74. Oksaar E: *Zur Vergleichbarkeit des Zweit- und Erstspracherwerbs*. Hrsg.: Oksaar E. *Zweitspracherwerb, Wege zur Mehrsprachigkeit und interkulturellen Verständigung*. Stuttgart, Kohlhammer Verlag, 2003: 107-110
 75. Padilla AM, Lindholm K: *Child bilingualism: the same old issues revised*. Martinez JL Jr., and Mendoza, Chicago: Psychology, Orlando Academic Press, 1984
 76. Papathanassiou D, Etard O, Mellet E et al.: A common language network for comprehension and production: a contribution to the definition of language epicentres with PET. *NeuroImage*, 2000; *11*:347-357

77. Papcun G, Krashen S, Terbeek D et al.: Is the left hemisphere specialized for speech, language and-or something else? *J Acoust Soc Am*, 1974; 55(2):319-327
78. Paradis M: Another sighting of differential language laterality in multilinguals, this time in Loch Tok Pisin: Comments on Wuilemin, Richardson and Lynch (1994). *Brain and Language* 1995, 49:173-186
79. Paradis M: Language and Communication in Multilinguals. Hrsg.:Stemmer B, Whitaker HA. *Handbook of Neurolinguistics*, San Diego:Academic Press, 1997: 417-430
80. Paradis M, Goldblum MC, Abidi R: Alternate antagonism with paradoxical translation behaviour in two bilingual aphasic patients. *Brain and language*, 1982, 15:55-69
81. Perani D, Dehaene S, Grassi F et al.: Brain processing of native and foreign languages. *Neuroreport*, 1996, 7:2439-2444
82. Perani D, Paulesu E, Galles et al.: The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language. *Brain*, 1998; 121:1841-1852
83. Peters A: Early syntax. Hrsg.:Fletcher P, Garman M. *Language acquisition studies in first language development*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986: 307-325
84. Pitres, Albert: Etude sur l'aphasie chez les polyglottes. *Révue de Médecine* 15, 1895: 873-899
85. Poulisse N: The use of compensatory strategies by Dutch learners of English. Dordrecht, The Netherlands, Foris, 1990
86. Price CJ, Green DW, v. Studnitz R: A functional imaging study of translation and language switching. *Brain*, 1999; 122:2221-2235
87. Rainer G, Miller EK: Effects of visual experience on the representation of objects in the prefrontal cortex. *Neuron*, 2000; 27:179-189
88. Rapport RL, Tan CT, Whitaker HA: Language function and dysfunction among Chinese- and English-speaking polyglots: cortical stimulation, Wada testing and clinical studies. *Brain Lang*, 1983; 18(2):342-366
89. Rees G, Friston K, Koch C: A direct quantitative relationship between the functional properties of human and macaque V5. *Nat. Neurosci*, 2000, 3:716-723
90. Rodriguez-Formells A, Rotte M, et al.: Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain. *Nature*, 2002, 415:1026-1029
91. Ross ED: Right hemisphere's role in language, affective behavior and emotion. *Trends in neurosciences*, 1984, 7:430-435
92. Roux FE, Tremoulet M: Organization of language areas in bilingual patients: a cortical stimulation study. *J Neurosurg*, 2002; 97(4):857-864
93. Rympa B, Prabhakaran V, Desmond JE et al.: Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *Neuroimage*; 1999, 9:216-226
94. Sanders LD, Neville HJ, Woldorff MG: Speech segmentation by native and non-native speakers: the use of lexical, syntactic and stresspattern cues. *J Speech Hear Res*; 2002, 45(3):519-530
95. Schwarzbauer C, Heinke W: Investigating the Dependence of BOLD Contrast on Oxygenative metabolism. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1999; 41:537-543
96. Smith EE, Jonides J: Working memory: A view from neuroimaging. *Cogn Psychol* 1997; 33,5-42

97. Snow C, Hoefnagel-Hohle M: The critical period for language acquisition: Evidence from second language learning. *Child development*, 1978; 49:1114-1128
98. Sperry RW: A modified concept of consciousness. *Phys Rev*, 1969; 76:532f
99. Talairach J, Tournoux P: *Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme, 1988
100. Thulborn KR, Waterton JC, Matthews PM et al.: Oxygenations depends of the transvers relaxation time of water protons in whole blood at high field. *Biochim-Biophys-Acta*, 1982; 714:265-270
101. Wartenburger I, Heekeren H et al.: Early Setting of Grammatical Processing in the bilingual Brain. *Neuron*, Vol.37, January 9, 2003
101. Volterra V, Taeschner T: The acquisition and development of language by bilingual children. *Journal of Child Language*, 1978; 5:311-326
102. Weber-Fox CM, Neville HJ: Maturation constraints on functional specializations for language processing: ERP and behavioral evidence in bilingual speakers. *J Cognitive Neuroscience*, 1996; 8(3):231-256
103. Wernicke C: *Der aphasische Symptomenkomplex*. Cohn und Weigert, Breslau, 1874
104. Whithaker, HA, Bub, D et al.: Neurolinguistic aspects of language acquisition and bilingualism. *Ann NY Acad Sci*, 1981; 379:59-74
105. Wise RJ, Greene J, Bueche C et al.: Brain regions involved in articulation. *Lancet*, 1999; 27 353(9258):1057-61
106. Yetkin O, Zerrin-Yetkin F, Houghton VM et al.: Use of functional MR to map language in multilingual volunteers. *AJNR-Am-J-Neuroradiol*, 1996; 17:473-477

12 EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich, Inken-Ulrike Wagelaar, erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Zweisprachigkeit: unterschiedliche Auswirkungen von parallelem und sequentiellm Spracherwerb auf die kortikale Organisation der Sprache; eine fMRT Studie“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Datum

Unterschrift

13 DANKSAGUNG

Mein herzlicher Dank geht an Alle die mir im Zusammenhang mit dieser Arbeit mit Wort, Rat, Tat und jeder anderen Form von Hilfe zur Seite standen.

Insbesondere seien erwähnt:

Nicole Dahlke

Heike Pelchen

Gradus Wagelaar

Silke Mey

Julia Wuttich

Andrea Tschirch

Cathleen Buckow

Heike Israel

14 CURRICULUM VITAE

Mein Lebenslauf wird aus Datenschutzgründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht mit veröffentlicht.