

Aus dem Neurozentrum des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf

Klinik für Neurologie

Direktor: Professor Dr. med. Cornelius Weiller

**Untersuchung der zeitlichen und räumlich-hemisphäriellen
Wortverarbeitung bei Mutter- und Fremdsprachlern
mittels Magnetenzephalographie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg vorgelegt

von

Christof Zöllner

aus Arnsberg

Hamburg 2004

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Universität Hamburg am:

Veröffentlicht mit Genehmigung des Fachbereiches Medizin der
Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende:

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter/in:

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter/in:

Meinen Eltern gewidmet

Abkürzungsverzeichnis

BEM	boundary element model
EEG	Elektroenzephalographie
EP	Evozierte Potentiale
ERP	event related potentials
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomographie
L1	Muttersprache
L2	Erste Fremdsprache
LIW	Linke Hemisphäre Invert-Wort
LW	Linke Hemisphäre Wort
MEG	Magnetenzephalographie
MGFP	mean global field power
n.v.	nicht verwertbar
PET	Positronenemissionstomographie
ROI	region of interest
RIW	Rechte Hemisphäre Invert-Wort
RW	Rechte Hemisphäre Wort
SD	Standarddeviation/-abweichung
SNR	signal to noise ratio
SQUID	superconducting quantum interference device

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Arbeitshypothese	8
2. Einleitung	9
3. Grundlagen	11
3.1 Historische Einführung.....	11
3.2 Sprachtheoretische Grundlagen	12
3.2.1 Schallweiterleitung und Hörbahn.....	12
3.2.2 Wernicke-Geschwind-Modell	13
3.2.3 Sprachtheorien	14
3.3 Grundlagen der Magnetenzephalographie.....	17
4. Methode und Durchführung.....	19
4.1 Probandenkollektiv	19
4.2 Stimulusprotokoll.....	20
4.3 MEG-Aufzeichnung	20
4.4 Koordinatentransformation	21
4.5 MRT- Daten	22
4.6 Anatomisches Volumenleitermodell	22
4.7 Datenanalyse und Quellenlokalisierung.....	23
5. Ergebnisse	25
5.1 Probanden mit Muttersprache Deutsch (Gruppe 1).....	26
5.1.1 Komponente C1 im Zeitbereich 90 - 130 ms	26
5.1.1.1 Untersuchungskategorie LW	26
5.1.1.2 Untersuchungskategorie LIW	27
5.1.1.3 Untersuchungskategorie RW	28
5.1.1.4 Untersuchungskategorie RIW.....	29
5.1.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C1	29
5.1.2 Komponente C2 im Zeitbereich 200 - 350 ms	31
5.1.2.1 Untersuchungskategorie LW	31
5.1.2.2 Untersuchungskategorie LIW	32

5.1.2.3	Untersuchungskategorie RW	33
5.1.2.4	Untersuchungskategorie RIW.....	34
5.1.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C2	35
5.1.3	Komponente C3 im Zeitbereich 400 - 500 ms	36
5.1.3.1	Untersuchungskategorie LW	36
5.1.3.2	Untersuchungskategorie LIW	37
5.1.3.3	Untersuchungskategorie RW	38
5.1.3.4	Untersuchungskategorie RIW.....	39
5.1.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C3	40
5.1.4	Komponente C4 im Zeitbereich 800 - 1200 ms.....	41
5.1.4.1	Untersuchungskategorie LW	41
5.1.4.2	Untersuchungskategorie LIW	42
5.1.4.3	Untersuchungskategorie RW	43
5.1.4.4	Untersuchungskategorie RIW.....	44
5.1.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C4	45
5.2	Probanden mit Deutsch als Fremdsprache (Gruppe 2).....	46
5.2.1	Komponente C1 im Zeitbereich 90 - 130 ms	46
5.2.1.1	Untersuchungskategorie LW	46
5.2.1.2	Untersuchungskategorie LIW	47
5.2.1.3	Untersuchungskategorie RW	47
5.2.1.4	Untersuchungskategorie RIW.....	48
5.2.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C1	49
5.2.2	Komponente C2 im Zeitbereich 200 - 350 ms	50
5.2.2.1	Untersuchungskategorie LW	50
5.2.2.2	Untersuchungskategorie LIW	51
5.2.2.3	Untersuchungskategorie RW	52
5.2.2.4	Untersuchungskategorie RIW.....	52
5.2.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C2	53
5.2.3.	Komponente C3 im Zeitbereich 400 - 500 ms	54
5.2.3.1	Untersuchungskategorie LW	54
5.2.3.2	Untersuchungskategorie LIW	55
5.2.3.3	Untersuchungskategorie RW	55
5.2.3.4	Untersuchungskategorie RIW.....	56
5.2.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C3	57
5.2.4	Komponente C4 im Zeitbereich 800 - 1200 ms.....	57
5.2.4	Komponente C4 im Zeitbereich 800 - 1200 ms.....	58
5.2.4.1	Untersuchungskategorie LW	58
5.2.4.2	Untersuchungskategorie LIW	58
5.2.4.3	Untersuchungskategorie RW	59
5.2.4.4	Untersuchungskategorie RIW.....	59
5.2.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C4	60

6. Diskussion	61
6.1. Diskussion der Ergebnisse	61
6.1.1 Komponente C1 der Gruppe 1 im Zeitbereich 90 - 130 ms	61
6.1.2 Komponente C1 der Gruppe 2 im Zeitbereich 90 - 130 ms.....	62
6.1.3 Komponente C2 der Gruppe 1 im Zeitbereich 200 - 350 ms.....	63
6.1.4 Komponente C2 der Gruppe 2 im Zeitbereich 200 - 350 ms.....	65
6.1.5 Komponente C3 der Gruppe 1 im Zeitbereich 400 - 500 ms.....	67
6.1.6 Komponente C3 der Gruppe 2 im Zeitbereich 400 - 500 ms.....	68
6.1.7 Komponente C4 der Gruppe 1 im Zeitbereich 800 - 1000 ms.....	69
6.1.8 Komponente C4 der Gruppe 2 im Zeitbereich 800 - 1000 ms.....	71
6.2 Diskussion der Methode	72
6.3 Diskussion des Versuchsaufbaus	73
7. Zusammenfassung	75
8. Literaturliste	76
9 Anhang	89
9.1 Danksagung	89
9.2 Lebenslauf	90
9.3 Eidesstattliche Versicherungen	91

1. Arbeitshypothese

Die Verarbeitung von Mutter- und Fremdsprache wurde mit verschiedenen Methoden wie Magnetenzephalographie (MEG), evozierten Potentialen (EP) und funktioneller Kernspintomographie (fMRT) untersucht.

Bei der kortikalen Verarbeitung von akustisch präsentierter Muttersprache werden primär Strukturen der linken Hemisphäre aktiv. Dabei sind zu unterschiedlichen Zeitabschnitten des Verarbeitungsprozesses verschiedene Areale im Sinne eines kortikalen Netzwerkes beteiligt (Friederici et al. 1995; Pulvermüller et al. 1995). Neuere wissenschaftliche Arbeiten konnten aber auch eine essentielle Bedeutung der rechten Hemisphäre nachweisen (Musso et al. 1999; Knecht et al. 2000).

Fremdsprachenstudien zeigten uneinheitliche Ergebnisse bezüglich der kortikalen Lokalisation von Mutter- und Fremdsprache. Es wurden sowohl separate (Halsband et al. 2002), als auch gemeinsame (Calabrese et al. 2001) kortikale Strukturen für die Verarbeitung der Sprachen beschrieben. Die kortikale Repräsentation der Fremdsprache scheint zum Teil vom Alter zum Zeitpunkt des Erlernens (Fabbro 2001) sowie vom Grad des Könnens abzuhängen (Perani et al. 1998).

In der vorliegenden Arbeit sollte mit Hilfe der Magnetenzephalographie die Frage untersucht werden, ob sich die kortikale Wortverarbeitung der Muttersprache in einem zeitlich und räumlich hierarchisch gegliederten Prozess vorwiegend linkshemisphärisch vollzieht, oder ob es sich um eine bihemisphäriell parallele Verarbeitung unter Einbeziehung der rechten Hemisphäre handelt.

Vergleichend sollte die kortikale Wortverarbeitung einer erlernten Fremdsprache analysiert werden, um zu untersuchen, ob die zeitlichen Abschnitte der Verarbeitung und die kortikale Repräsentation denen der Muttersprache ähnlich, oder sogar mit ihnen identisch sind.

2. Einleitung

Die Sprache ist eine einzigartige und essentielle Fähigkeit des Menschen und ein bemerkenswertes Beispiel für die Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns. Wir schaffen es, aus einem mentalen Wörterbuch etwa 180 Worte pro Minute meist fehlerlos zu sprechen, und so eigene Gedanken und Ideen mitzuteilen, sowie die von Anderen zu verstehen (Kandel und Schwartz 1998). Der Mensch ist dabei in der Lage, neben der Muttersprache (L1) auch eine, oder sogar mehrere, Fremdsprachen (L2) zu erlernen.

Die Verarbeitung von Sprache findet in differenzierten kortikalen Strukturen, vor allem in den fronto-temporalen Regionen der linken Hemisphäre statt. Aber auch die korrespondierenden Areale der rechten Gehirnhälfte sind bei der Sprachverarbeitung und -produktion entscheidend mitbeteiligt.

Zur wissenschaftlichen Untersuchung der Sprache wurden unterschiedliche Techniken wie die Elektroenzephalographie (EEG) (Weiss und Rappelsberger 1996; Weiss und Müller 2003), die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) (Hinke et al. 1993; Binder et al. 1996; Rossel et al. 2003; Musso et al. 2003), die Positronenemissionstomographie (PET) (Petersen und Fiez. 1993; McGuire et al. 1996) und die Magnetenzephalographie (MEG) (Diesch und Luce 1997, Simos et al. 1998, Breier et al. 1999; Pulvermüller et al. 2003) angewandt. Mittels dieser Verfahren konnten verschiedene neuronale Gebiete mit Sprachverarbeitungs-funktion bestimmt werden. Zusätzlich zu den Ende des 19. Jahrhunderts beschriebenen Gebieten im linken Frontal- und Temporallappen (Broca- und Wernicke-Areal), fanden sich auch Aktivierungen im Gyrus temporalis medius und inferior und Gyrus angularis (Binder et al. 1997), Gyrus supramarginalis (Price et al. 2000), im Stammganglienbereich (Wallesch 1991; Kotz et al. 2003) und im Hippocampus (Opitz et al. 2003; Knecht 2004) der linken Hemisphäre. Aber auch die potentielle Sprachkapazität der rechten Gehirnhälfte konnte schon früh, zunächst mittels Patientenstudien nach Hemisphärenektomie, gezeigt werden (Smith 1966; Gott 1973). Bestätigt wurde die wichtige Rolle der rechten Hemisphäre durch klinische Arbeiten mit Schlaganfallpatienten. Es zeigten sich sowohl Aktivierungen in periläsionalen Gebieten der linkshemisphärischen, sprachrelevanten Gebiete, als auch Aktivierungen homologer Areale in der

rechten Hemisphäre (Weiller et al. 1992, 1998, Cappa 1997; Heiss et al. 1997; Musso et al. 1999, Saur 2004). Diese Aktivierungen deuteten auf eine kortikale Reorganisation von Sprache hin (Rijntjes und Weiller 2002), die auch bilateral strukturiert sein kann (Musso et al. 1999). Aktivierungen der korrespondierenden Areale der rechten Hemisphäre konnten auch bei der Sprachverarbeitung gesunder Probanden gezeigt werden (Weiller et al. 1995, Musso et al. 1999; Meyer et al. 2000, Knecht et al. 2000). Die höchste Leistungsfähigkeit der einzelnen Gebiete schien dabei erst durch eine bilaterale Interaktion zustande zu kommen (Mesulam 1994; Musso et al. 1999).

Neben der funktionell-anatomischen Organisation wurde die zeitliche Abfolge der Sprachverarbeitung untersucht. Ziel dieser Studien war, die unterschiedlichen sprachwissenschaftlichen Aspekte wie Prosodie, Syntax und Semantik zeitlich voneinander abzugrenzen (Friederici et al. 1995, 2000; Marinkovic 2004). Dabei stellte sich eine zeitlich-sequentielle Aktivierung spezifischer Sprachareale dar.

Auch die Verarbeitung von Fremdsprache wurde schon früh untersucht. In den 1970`er Jahren vermutete man spezifische Fremdsprachenareale im Temporallappen der linken Hemisphäre (Ojemann und Whitaker 1978). Neuere Studien zeigten teils unterschiedliche (Kim et al. 1997; Halsband et al. 2002), teils vergleichbare (Calabrese et al. 2001) Aktivierungen für Mutter- und Fremdsprache im Broca-Areal, während die Aktivierungen im Wernicke-Areal weitgehend identisch waren (Hernandez et al. 2001). Kim konnte nachweisen, dass diese Unterschiede vom Zeitpunkt des Erlernens einer Fremdsprache abhingen. Als kritische Periode galt dabei ungefähr das siebte Lebensjahr (Kim et al. 1997; Fabbro 2001). Zudem schien der Grad des Beherrschens der Fremdsprache einen wesentlichen Einfluss auf die kortikale Repräsentation zu haben (Perani et al. 1998; Chee et al. 1999 und 2001). Der exakte zeitliche Ablauf, sowie die kortikale Repräsentation und Interaktion der Verarbeitung von Mutter- und Fremdsprache sind aktuell noch immer Gegenstand der Diskussion.

3. Grundlagen

3.1 Historische Einführung

Das menschliche Gehirn ist in seinem morphologischen Aufbau nicht symmetrisch. Die Temporalregion der linken Hemisphäre, das so genannte Planum temporale, ist bei 67 % der Rechtshänder größer als in der rechten Gehirnhälfte (Kandel und Schwartz 1998). Dieser Hemisphärenunterschied scheint sich beim evolutionären Übergang vom Affen zum Menschen herausgebildet zu haben. Paläontologische Studien gaben Anhaltspunkte für den Zeitpunkt der Ausbildung des Sprachvermögens. Da die großen Hirnwindungen der Kortexoberfläche Abdrücke in der Schädelkalotte hinterlassen, konnten fossile Überreste frühmenschlicher Schädel mit modernen Abdrücken verglichen werden. Bei beiden zeigte sich eine deutliche Vergrößerung der linksseitigen temporalen Windungen. Diese Hemisphärenasymmetrie ließ auf ein linksseitiges anatomisches Korrelat der Sprachverarbeitung schließen. Erste Ansätze von Kommunikation konnten aufgrund dieser Studien schon mit Auftreten der Gattung Homo sapiens vor etwa 300'000 Jahren vermutet werden (LeMay 1976).

Paul Broca dokumentierte Ende des 19. Jahrhunderts linkshemisphärische kortikale Läsionen durch post mortem Untersuchungen an Patienten mit Sprachausfällen (Broca et al. 1861). Der betreffende Abschnitt des linken Gyrus frontalis inferior wird heute als Broca-Areal bezeichnet (siehe Abbildung 1).

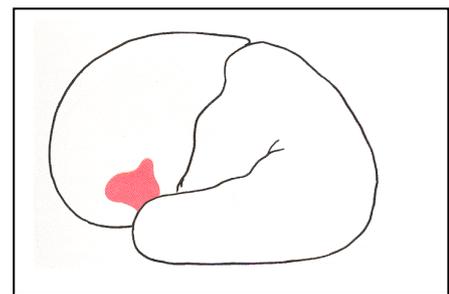


Abbildung 1: Schematische Darstellung des „Broca-Areals“ im Gyrus frontalis inferior der linken Hemisphäre aus: Trepel Neuroanatomie 1999

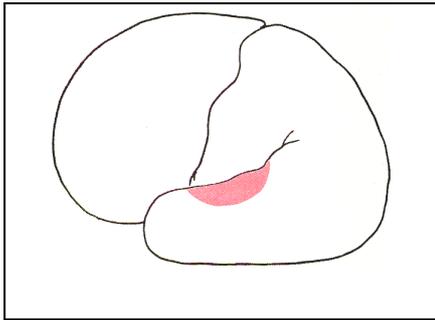


Abbildung 2: Schematische Darstellung des „Wernicke-Areals“ im Gyrus temporalis superior der linken Hemisphäre aus: Trepel Neuroanatomie 1999

1908 beschrieb Carl Wernicke ein Kortexareal im Bereich der linken Temporalregion, welches besonders bei Patienten mit Störungen des Sprachverständnisses geschädigt war und heute als Wernicke-Areal bezeichnet wird (Wernicke 1908) (siehe Abbildung 2). Dieses scheint vor allem für das Sprachverständnis, aber auch für die Bewertung und Einordnung von Geräuschen und Klängen verantwortlich zu sein.

3.2 Sprachtheoretische Grundlagen

3.2.1 Schallweiterleitung und Hörbahn

Die Verarbeitung einer akustischen Information beginnt am äußeren Ohr mit der Aufnahme der Schallwellen über die Ohrmuschel. Via Trommelfell wird die Schwingungsbewegung auf die Gehörknöchelchen weitergegeben und mit Auftreffen auf das Foramen ovale etwa zwanzigfach in der Intensität verstärkt. Die im Innenohr befindliche Endolymphe wird in periodische Schwingungen versetzt, wodurch es zu, den Wellenlängen entsprechenden, Auslenkungen der akustischen Sinneszellen (Haarzellen) kommt. Die akustische Information erfährt damit schon auf Ebene

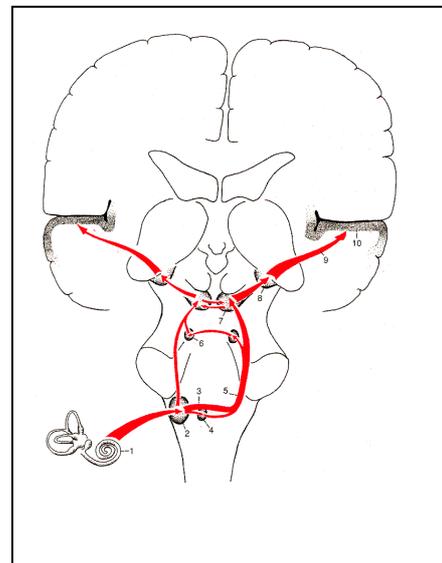


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Hörbahn, aus Trepel Neuroanatomie 1995

des Hörapparates eine erste tonotopische Gliederung, welche bis zum Erreichen der primären Hörrinde (Area 41 nach Brodmann) beibehalten wird (Henkel 1998).

Die Haarzellen geben die mechanische Auslenkung in Form eines elektrischen Impulses über eine kurze Neuronenkette zum Nervus acusticus weiter. Über diesen ziehen die afferenten Fasern der basalen und apikalen Cochlea zu den Nuclei cochleares in der Medulla oblongata. Ein Teil der Fasern verläuft ipsilateral, ein größerer Teil jedoch kontralateral über die Oliva superior als Lemniskus lateralis zur Vierhügelplatte. An dieser Stelle kreuzen erneut Anteile auf die Gegenseite. Der Rest der Fasern gelangt über die Corpora geniculata medialis des Thalamus in den primären auditorischen Kortex (siehe Abbildung 3).

3.2.2 Wernicke-Geschwind-Modell

Wernicke entwickelte ein, später durch Geschwind modifiziertes, Modell der Sprachverarbeitung, welches auch heute noch verwendet wird (siehe Abbildung 4).

Von der Area 41 ausgehend führen efferente Fasern zu den Areae 42 und 22, der sekundären Hörrinde (Wernicke-Zentrum) im Bereich des oberen/hinteren Anteils des Gyrus temporalis superior.

Weiter bestehen Verbindungen zum Gyrus angularis, welcher einen Teil des parieto-temporalen Assoziationskortex darstellt.

Hier erfolgt eine Verschaltung afferenter visueller und akustischer Informationen, und es wird wiederum das Wernicke-Areal aktiviert, welches für das inhaltliche Verstehen eines Wortes eine Rolle spielt.

Über den Fasciculus arcuatus bestehen Verbindungen zum Broca-Areal (Area 45)

im Gyrus frontalis inferior, wo unter anderem die grammatikalische Sprachverarbeitung vermutet wird (Kandel und Schwartz 1998).

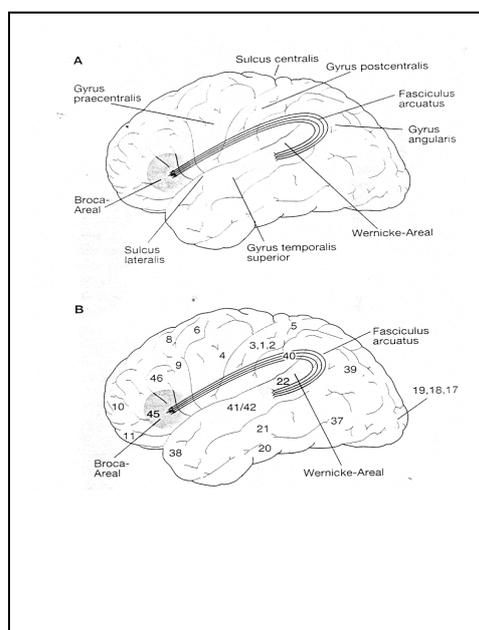


Abbildung 4:

A: Wernicke-Geschwind-Modell der Sprachverarbeitung in der linken Hemisphäre; Benennung der anatomischen Strukturen

B: Wernicke-Geschwind-Modell der Sprachverarbeitung in der linken Hemisphäre; Benennung der Area-Einteilung nach Broca

aus Kandel und Schwartz:
Neurowissenschaften 1998

Läsionen im Bereich der oben beschriebenen Gebiete, z.B. durch eine Ischämie, Blutung oder Neoplasie, verursachen umschriebene Sprachfunktionsstörungen. So führt beispielsweise eine Läsion im Bereich des Wernicke-Areals zu einer Störung des Sprachverständnisses (Wernicke-Aphasie). Das Spontansprechen ist zwar flüssig, jedoch ohne inhaltlichen Zusammenhang. Häufig ist diese Form der Aphasie verbunden mit semantischen Paraphrasien und Neologismen bis hin zur Jargon-Sprache. Die Broca-Aphasie hingegen ist gekennzeichnet durch einen Verlust der Spontansprache bei weitgehend erhaltenem Sprachverständnis. Es kommt zu einer stark eingeschränkten Ausdrucksfähigkeit in Sprache, Schrift und beim Lesen. Eine Unterbrechung des Fasciculus arcuatus, als Verbindung zwischen den Arealen Broca und Wernicke, führt zu einer Leitungsaphasie, welche durch eine flüssige Sprache mit phonematischen Paraphrasien und einem Defizit im Nachsprechen von Worten gekennzeichnet ist. Klinisch sind die verschiedenen Aphasieformen jedoch nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar, da die geschädigten Bereiche oft von größerer Ausdehnung sind und dadurch Mischformen entstehen. Selbst eine lokal umschriebene Schädigung der oben genannten Gebiete führt nicht zwangsläufig zur vollen Ausprägung der erwarteten Funktionsstörungen. Vielmehr tritt diese erst durch Beteiligung angrenzender Gebiete zu Tage (Hinton 1991).

3.2.3 Sprachtheorien

Das oben beschriebene Modell ist lediglich als grobes Schema zu verstehen und geht grundsätzlich von der Annahme aus, dass sprachassoziierte Verarbeitungsvorgänge in der dominanten Hemisphäre lokalisiert sind. In einer Studie von Wada und Rasmussen wurde postuliert, dass bei 96 % der Rechtshänder und 70 % der Linkshänder das Sprachzentrum ausschließlich in der linken Hirnhälfte zu finden sei. Bei 4 % der Rechts- und 15 % der Linkshänder konnte man es jedoch nur in der rechten Hemisphäre nachweisen (Wada und Rasmussen 1960). Neuere Studien zeigten sogar eine rechts-hemisphärische Dominanz bei 7,5 % rechtshändiger Probanden ohne geschlechtsspezifische Unterschiede. Dabei schien die Sprachlateralisierung eher einem fließenden Übergang, als einer strengen Rechts-/Links-Dominanz zu entsprechen (Knecht et al. 2000).

Pulvermüller konnte elektrophysiologisch Hinweise für Sprachverarbeitung in der rechten Hemisphäre finden. In Anlehnung an Hebb (1949) ging er davon aus, dass bei komplexen Aufgaben relativ große, Hemisphären-übergreifende Kortexgebiete im Sinne eines kortikalen Netzwerkes mit einbezogen werden. Je nach Art des zu verarbeitenden Wortes (Verb oder Nomen) sind diese unterschiedlich stark ausgedehnt. Nomen nehmen ein großes Neuronennetz in Anspruch, welches auf beide Hemisphären verteilt ist. Netzwerke

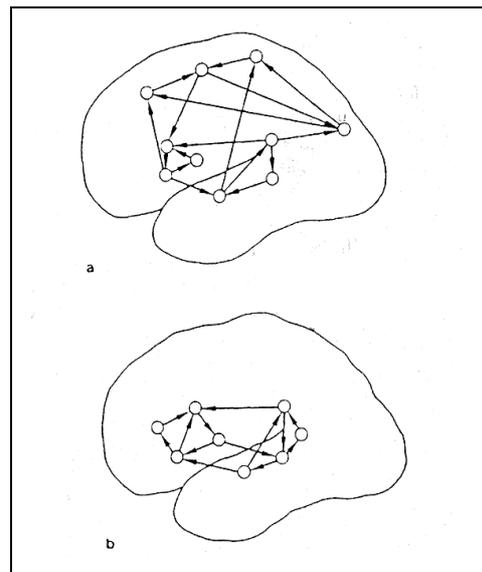


Abbildung 5: Kortikales Netzwerk nach Präsentation von Nomen (a) und Verben (b) aus Pulvermüller 1995

für Verben sind hingegen weniger stark verzweigt, dafür eher zur linken Gehirnhälfte hin lateralisiert (Pulvermüller et al. 1996) (siehe Abbildung 5).

Andere wissenschaftliche Studien befassten sich mit den zeitlichen Abläufen der Sprachverarbeitung. Grundlage dazu war die Vermutung, dass verschiedene Sprachaspekte wie Phonologie, Syntax oder semantische Inhalte in definierter zeitlicher Abfolge und spezifischen anatomischen Arealen verarbeitet werden (Friederici et al. 1993, 1995). Prinzipiell konnten nach diesen Studien drei unterschiedliche Phasen der Sprachverarbeitung benannt werden:

Eine erste Komponente im Bereich um 200 ms nach Beginn eines akustischen Stimulus, welche bei syntaktischen Fehlern auftritt und auf Grund ihres frühen Erscheinens und der Lokalisation im links-frontalen Kortex als ELAN (Early Left Anterior Negativity) bezeichnet wurde (Friederici 1995). Aktivierungen bei syntaktischen Fehlern konnten auch in anderen Studien gezeigt werden, jedoch unterschieden sich die ermittelten Zeitpunkte dabei beträchtlich. Neville beispielsweise fand eine entsprechende Aktivierung noch deutlich früher, bei zirka 125 ms (Neville et al. 1991). Eine weitere Komponente, im Sinne einer semantischen Verarbeitung, führt zirka 400 ms nach Präsentationsbeginn zu einer Aktivierung (Kutas und Hillyard 1983). Sie ist im parietalen Kortex der linken Hemisphäre lokalisiert und wurde bei ERP-Studien (event related potentials) als N400 bezeichnet. Die dritte Aktivierung wurde als P600 bezeichnet und tritt ebenfalls im links-parietalen Kortex auf. Es wurde vermutet, dass auch diese

durch syntaktische Fehler hervorgerufen wird, jedoch eher eine Kontrollfunktion hat (Friederici 1995). Zeitlich vor diesen drei Komponenten gelegen, nach zirka 100 ms, fand sich bei akustischen Experimenten die N100-Komponente. Viele Studien beschäftigten sich mit dieser meist mit hoher Signalintensität auftretenden und damit gut reproduzierbaren Aktivierung im primär akustischen Kortex (Loveless et al. 1996; Pihko et al. 1997). Die N100 stellte sich in den Hessel'schen Querwindungen beider Hemisphären ohne die bei den drei anderen Komponenten beschriebene Lateralisation zur linken Hirnhälfte dar (Numminen et al. 1999). Vielmehr schien die akustische Antwort bilateral organisiert zu sein und die rechte Hemisphäre dabei früher aktiviert zu werden (Frith et al. 1991).

Studien zur Fremdsprachenverarbeitung bei bilingualen Probanden zeigten variable Lokalisationsunterschiede im Vergleich zur Muttersprache. So fanden Ojemann und Whitaker in beiden Temporallappen Aktivität, jedoch unterschieden sich die involvierten Areale bei Mutter- und Fremdsprache teilweise (Ojemann und Whitaker 1978). Klein hingegen zeigte in einer PET-Studie mit bilingualen Versuchspersonen Aktivität in linksseitig temporo-frontalen Arealen des Gehirns mit Verarbeitung von Mutter- und Fremdsprache in denselben anatomischen Arealen (Klein et al. 1995). Ebenso konnte auch mittels fMRT keine unterschiedliche Repräsentation zweier Sprachen gefunden werden (Hernandez et al. 2001).

Das Alter, in welchem die zweite Sprache erlernt wird, scheint dabei wichtig für die kortikale Repräsentation zu sein. Die Interaktion der aktivierten Hemisphärengebiete war je nach Zeitpunkt des Erlernens unterschiedlich (Fiebach et al. 2003). Bei Zweitsprachigkeit nach dem siebten Lebensjahr (Fabbro 2001) wurden unterschiedliche Aktivierungsareale für Mutter- und Fremdsprache gefunden. Bei so genannten "Spätlernern" zeigten sich Unterschiede im Broca-Areal der linken Hemisphäre, wogegen die Wernicke-Region bei Mutter- und Fremdsprache unabhängig vom Alter aktiviert wurde (Kim et al. 1997).

Neben dem Alter des Erlernens beeinflusst auch der Grad des Könnens einer Fremdsprache die kortikale Repräsentation. Je besser die Sprache beherrscht wurde, desto schneller und korrekter war die Verarbeitung in den sprachassoziierten Arealen der linken Hemisphäre (Chee et al. 2001). Dabei schien die Verarbeitung unterschiedlicher sprachlicher Aspekte wie z.B. der Grammatik eher

vom Alter, die Semantik jedoch eher vom Können abzuhängen (Wartenburger et al. 2003).

Auch die Lateralisierung der Fremdsprachen-Verarbeitung wurde kontrovers diskutiert. In den Untersuchungen der 1980'er Jahre wurde dabei vor allem die linke Gehirnhälfte als hauptsächlich beteiligt angesehen (Hynd et al. 1980; Zatorre 1989). Neuere Studien zeigten jedoch, dass die rechte Hemisphäre bei der Sprachverarbeitung ebenfalls aktiv wird (Coney und Evans 2000).

3.3 Grundlagen der Magnetenzephalographie

Mikroskopisch besteht der Kortex aus zirka 10 Milliarden Neuronen. Ein Großteil dieser Zellen sind Pyramidenzellen. Diese zeichnen sich durch einen weit verzweigten, zuführenden Dendritenbaum und einen einzeln wegführenden Nervenast (Axon) aus. Der Hauptast zieht senkrecht zur Kortexoberfläche und kann damit auch größere Entfernungen überbrücken (Kandel und Schwartz 1998). Charakteristisch für die Pyramidenzellen ist weiter, dass sie häufig in großer Anzahl parallel zueinander angeordnet sind. Diese Art von Zellverband wird als „open-field Zellen“ bezeichnet, bei denen sich das bei Erregung entstehende elektrische Feld durch einen Summationseffekt

vergrößert. Ein solcher Effekt findet sich bei den kaum ausgerichteten „closed-field Zellen“ nicht (Orrison und Lewine 1997) (siehe Abbildung 6).

Die Bildung eines einzelnen Aktionspotentials führt nicht zu einem messbaren neuromagnetischen Feld. Erst auf Grund der parallelen Anordnung der Pyramidenzellaxone können sich neuronale Potentiale zu einem messbaren Signal summieren.

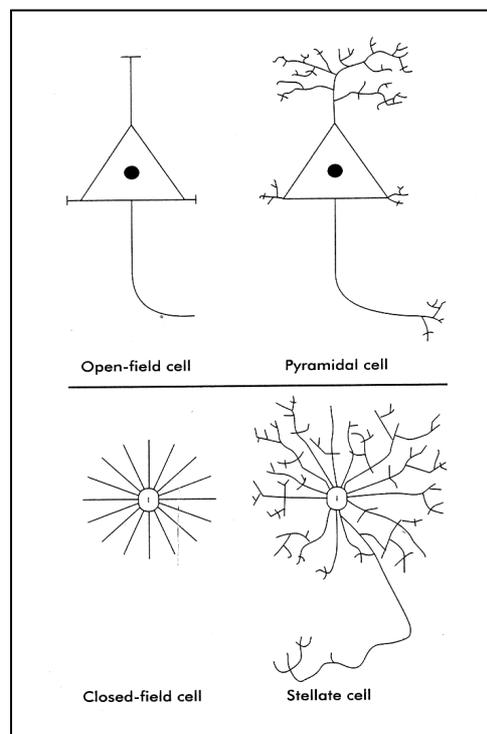


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Pyramidenzellen des Kortexes als Open-field und Closed-field Zelle
Aus Orrison und Lewine 1997

Jeder elektrische Stromfluss erzeugt nach der Gesetzmäßigkeit von Oersted ein rechtwinklig und zirkulär zur Stromrichtung stehendes Magnetfeld. Dies gilt auch für die in den Pyramidenzellen entstehenden Ströme.

Prinzipiell finden sich an der erregten Synapse drei Arten von Strömen mit jeweils unterschiedlichem, theoretischem Anteil am messbaren neuromagnetischen Feld:

- a) Intrazelluläre Ströme – vermutlicher Hauptanteil
- b) Extrazelluläre Ströme – vermutlicher Nebenanteil
- c) Transmembranale Ströme – vermutlich kein Anteil.

Der intrazelluläre Stromfluss besteht in erster Linie aus den inhibitorischen und exzitatorischen, postsynaptischen Strömen, durch welche das neuromagnetische Feld erzeugt wird (Williamson und Kaufmann 1987). Mittels Magnetenzephalographie (MEG) lassen sich die beim elektrischen Stromfluss entstehenden neuromagnetischen Felder aufzeichnen.

Zur Rekonstruktion der vermuteten Quelle eines Feldes können verschiedene Modelle, wie z.B. das Dipolmodell, eingesetzt werden. Die MEG erfasst in erster Linie tangential zur Kortexoberfläche entstandene Dipole, welche durch Neuronengruppen in den Wänden der Sulci generiert werden. Radial zur Kortexoberfläche ausgerichtete Dipole erzeugen lediglich ein 6- bis 12-fach schwächeres Magnetfeld und werden daher üblicherweise nicht in die Quellenlokalisationsbestimmung einbezogen (Haueisen et al. 1995). Bei der Berechnung der resultierenden Quellen ist das so genannte Inverse Problem zu bedenken. Nach dem Gesetz von Biot-Savart ist es möglich, das magnetische Feld einer elektrischen Quelle zu berechnen. Der umgekehrte Weg – die Berechnung von Quellenparametern wie Ort und Größe der Quelle aus den Feldkomponenten – ist nicht ohne Weiteres möglich, da ein magnetisches Feld mehrere Quellen als Ursprung haben kann. Diesen Umstand bezeichnet man als Nichteindeutigkeit des Inversen Problems (Balish und Muratore 1990). Durch Annahme einer oder mehrerer dipolartiger Quellen, lässt sich jedoch die Anzahl der möglichen Lösungen weitgehend einschränken. Die Qualität der Quellenrekonstruktion lässt sich zusätzlich durch Anwendung spezifischer Volumenleitermodelle, wie z.B. dem boundary element model (BEM), steigern.

4. Methode und Durchführung

4.1 Probandenkollektiv

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt 17 Personen (neun weibliche und acht männliche) mit einem Durchschnittsalter von 26,3 Jahren untersucht.

Bei einer Versuchsperson konnten die Daten wegen eines Transformationsfehlers der anatomischen Landmarken (siehe unten) nicht ausgewertet werden. Bei einem weiteren Probanden waren die erhobenen Daten auf Grund eines Fehlers bei der Signalaufzeichnung nicht zu verwerten. Die verbleibenden 15 Probanden wurden in zwei Untersuchungsgruppen eingeteilt:

Gruppe 1: Zehn Probanden mit Deutsch als Muttersprache
(fünf weibliche und fünf männliche, Durchschnittsalter 25,5 Jahre)

Gruppe 2: Fünf Probanden mit Deutsch als Fremdsprache
(drei weibliche und zwei männliche, Durchschnittsalter 27 Jahre)

Die Untersuchten der zweiten Gruppe lebten seit anderthalb bis vier Jahren in Deutschland (Zweisprachigkeit nach dem 20. Lebensjahr) und beherrschten die deutsche Sprache fließend.

Bei keiner der Versuchspersonen gab es Hinweise auf neurologische Erkrankungen. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung konnten außerdem in einer orientierenden Untersuchung keine sprachlichen Defizite festgestellt werden. Die sprachliche Entwicklung war anamnestisch unauffällig (kein Lispeln oder Stottern). Alle Personen fühlten sich subjektiv wohl, erschienen motiviert und konzentriert. Die Untersuchungen fanden jeweils tagsüber zwischen 10.00 und 14.00 Uhr statt. Alle Versuchsteilnehmer wurden vor den Messungen über den Versuchsaufbau und -ablauf informiert und gaben anschließend Ihr schriftliches Einverständnis zu den Versuchsbedingungen. Der Studie lag eine Genehmigung der Ethikkommission der Friedrich Schiller Universität Jena zu Grunde.

4.2 Stimulusprotokoll

Dem Freiburger Sprachtest wurden 80 einsilbige Worte (Nomen, z.B.: Hund, Mehl) entnommen. Alle Worte waren einander in Bezug auf Frequenzspektrum und Dauer ähnlich. Aus diesen Nomen wurden 40 ausgewählt und mit Hilfe einer Sound-Blaster-Software invertiert; d.h. es war möglich, die Worte rückwärts abgespielt zu präsentieren. So konnte eine Gesamtstimulusanzahl von jeweils 80 Worten und 80 invertierten Worten erreicht werden, wobei die invertierten Worte jeweils zweimal präsentiert wurden.

Zusätzlich wurde eine gleiche Anzahl von „Leeraufnahmen“, d.h. Aufnahmen der kortikalen elektrischen Potentiale zwischen den eigentlichen Stimuli zur Abschätzung der Ruheaktivität, durchgeführt. Diese Leermessungen wurden in unregelmäßigen Abständen zwischen die Wort- bzw. Invert-Wort-Präsentationen gesetzt. Dadurch sollte einerseits ein Abflachen der Aufmerksamkeit des Probanden verhindert, andererseits eine Einschätzung des Hintergrundrauschens mittels Vergleich mit den Aktivitätsmessungen ermöglicht werden.

Jeder Stimulus hatte eine mittlere Länge von 600 ms. Die Worte, bzw. invertierten Worte wurden in einer pseudo-randomisierten Reihenfolge präsentiert, wobei das Interstimulus-Intervall 1,6 Sekunden betrug. Gleichzeitig zum Stimulus wurde über einen gesonderten Kanal ein nicht hörbares Trigger-Signal gesendet, um bei der späteren Auswertung den genauen Stimulusbeginn bestimmen zu können. Der Aufnahmezeitraum erstreckte sich von 100 ms vor bis 1400 ms nach Trigger-Beginn. Eine Gruppe von fünf Worten, bzw. Invert-Worten wurde jeweils zu einer Präsentationseinheit zusammengeschlossen und abwechselnd hintereinander präsentiert. Die "Gesamtstimulusbox" wurde den Probanden in zwei aufeinander folgenden Messungen jeweils monoaural dargeboten und das Signal über der kontralateralen Hemisphäre abgeleitet. Bei jeder Versuchsperson konnten auf diese Weise zwei voneinander unabhängige Messungen durchgeführt werden.

4.3 MEG-Aufzeichnung

Die Messwerterfassung erfolgte mit einem 31-Kanal-MEG-Meßsystem (Philips), welches sich im Biomagnetischen Zentrum Jena (Klinik für Neurologie) befindet. Die Anlage besteht aus zwei unabhängig voneinander positionierbaren Kryostaten mit jeweils 31 axial ausgerichteten Gradiometerspulen (Gradiometer 1. Ordnung)

in superconducting quantum interference device (SQUID) Technik. Die Spulen sind in einem, zur Kühlung mit flüssigem Helium gefüllten Dewar angeordnet. Die parallel angebrachten Sensoren decken ein Areal von etwa 140 mm im Durchmesser ab. Die Signale wurden mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz aufgezeichnet, die resultierenden Daten mit einem Fourier-Filter im Bereich von 0,3 bis 30 Hz und einem 50 Hz Notch-Filter bearbeitet. Zur weiteren Auswertung wurde die im Biomagnetischen Zentrum vorhandene CURRY™-Software benutzt. Der Kryostat wurde möglichst nah, aber berührungsfrei über dem rechten, bzw. linken Temporallappen positioniert. Zur Kontrolle der Stellung der Messeinheit wurde vor der eigentlichen Signalaufzeichnung eine rein akustische Stimulation durchgeführt. Hierbei wurde die zu erwartende tangentielle Feldkomponente bei zirka 100 ms (N100), generiert im akustischen Kortex des Temporallappens, abgeleitet. Für diese Probemessung wurden 60 gemittelte Trials eines Tones von 1 kHz verwendet. Die Position des Meßsystems in Bezug auf die Kopfoberfläche wurde anhand des sich darstellenden Dipolfeldes solange verändert, bis Minimum und Maximum der Feldverteilung ersichtlich wurden, und die Nulllinie etwa in der Mitte der region of interest (ROI) zu liegen kam.

Alle Sprachreize wurden mit Hilfe einer Sound-Blaster-Software generiert und über einen Kunststoffschlauch (Durchmesser 1,5 cm, Länge 2,5 m) mit Trichteraufsatz in die magnetisch abgeschirmte Versuchskammer geleitet. Dabei war der Trichter mit einer Vakuum-Matratze verbunden, um den Versuchspersonen ein bequemes, und damit möglichst bewegungsarmes, Liegen zu ermöglichen. Auf Grund der Schlauchlänge wurde bei den im Folgenden bearbeiteten Latenzen eine zusätzliche Leitungszeit von 15 ms berücksichtigt.

Die Stimuli wurden dem auf der Seite liegenden Probanden monoaural präsentiert und das entstehende Signal über der kontralateralen Hemisphäre abgeleitet. Anschließend wurde das Vorgehen über der anderen Gehirnhälfte wiederholt, nachdem der Proband umgelagert und der Kryostat neu positioniert wurde.

4.4 Koordinatentransformation

Um die durch MEG aufgezeichneten Signalquellen später mittels Magnetresonanztomographie (MRT) lokalisieren zu können, mussten die jeweiligen Daten aus MEG- und MRT-Messung in demselben Bezugssystem dargestellt werden. Hierzu wurden vor den Messungen die individuellen

Raumpunktdaten von vier anatomischen Punkten an der Kopfoberfläche des jeweiligen Probanden (Nasion, Vertex, Ansatz des rechten und linken Tragus) und die der Kryostat-Spulen mit Hilfe eines elektronischen 3D-Digitizers (Polhemus 3D-Tacker) ermittelt. Der Kopf des Probanden wurde während des Digitalisierens in einer umgebauten ophthalmologischen Kopfstütze fixiert, um Aufnahmefehler durch Bewegungsartefakte zu minimieren. Unter Anwendung einer Koordinaten-Transformations-Software, erstellt im Biomagnetischen Zentrum in Jena (Huonker et al. 1996), konnten die Daten aus dem Polhemus-System in das MRT-Koordinatensystem transformiert werden.

4.5 MRT- Daten

Von jedem Probanden wurde innerhalb einer Woche nach der Datenaufnahme ein isotroper MRT-Datensatz erstellt. Dieser T1 gewichtete 3D-Scan (256 Schichten mit je 1 mm Schichtdicke) wurde mit einem Gerät vom Typ Gryoscan™ (Philips Medical Systems) mit einer Feldstärke von 1,5 T vorgenommen.

Der MRT-Datensatz bildete, zusammen mit den oben beschriebenen Koordinaten aus der Digitalisierung der Spulen und Kopfpunkte die Grundlage zur individuellen anatomischen Lokalisation der Dipolquellen.

4.6 Anatomisches Volumenleitermodell

Um die Qualität der Quellenlokalisierung zu erhöhen, wurde auf der Basis des MRT-Datensatzes ein individuell-anatomisches Volumenleitermodell vom BEM-Typ generiert. Dies war notwendig, da sich die elektrische Leitfähigkeit von Hirngewebe und Liquor stark von derjenigen von Schädelknochen und Luft unterscheidet. Dazu wurde der MRT-Datensatz mit einer Grauwert-Segmentierung bearbeitet und eine Kortex-Rekonstruktion mit Punktabständen von 1 mm berechnet. Um die stark gegliederte Oberflächenkontur des Kortex erfassen zu können, wurde das Resultat der Segmentierung geglättet und um jeweils 1 mm dilatiert, so dass das resultierende Volumen dem Hirnvolumen und dem des umgebenden Liquorraumes entsprach. Die so entstandene Kortex-Rekonstruktion wurde als Grundlage der BEM-Berechnung verwendet, welche anschließend wiederum mit Hilfe der CURRY™-Software erfolgte.

4.7 Datenanalyse und Quellenlokalisierung

Jeweils 80 Einzeltrials der Untersuchungsgruppen Worte und Invert-Worte wurden analysiert. Bezogen auf die jeweils untersuchte Hemisphäre entstanden so folgende Untersuchungskategorien:

LW: Linke Hemisphäre Wort

LIW: Linke Hemisphäre Invert-Wort

RW: Rechte Hemisphäre Wort

RIW: Rechte Hemisphäre Invert-Wort.

Abbildung 7 zeigt als Beispiel die gemittelten Daten der Untersuchungskategorie LW eines Probanden der Gruppe 1 nach Filterung in einem Butterflyplot. Im unteren Teil der Abbildung wurde die mean global field power (MGFP) als Maß für den zeitlichen Verlauf der über alle Kanäle gemittelten magnetischen Feldstärke dargestellt (violette Linie).

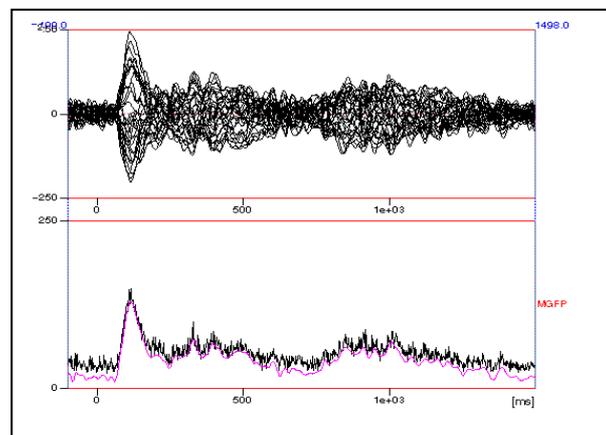


Abbildung 7.: Darstellung der Feldstärke in Femtotesla (fT) über dem Zeitverlauf in Millisekunden (ms) als Butterflyplot eines Probanden der Gruppe 1, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wortpräsentation (LW).

Aus dem Verlauf der MGFP ließen sich Aktivierungs-Zeitareale im Vergleich zur Ruhemessung abschätzen. In Anlehnung an die Literatur wurden vier Zeitbereiche, bzw. Komponenten (C1 - C4) zur Analyse ausgewählt:

C1: 90 - 130 ms (Diesch et al. 1997)

C2: 200 - 350 ms (Connolly et al. 1990)

C3: 400 - 500 ms (Münste et al. 1990)

C4: 800 – 1200 ms (Haggort und Brown 2000).

Die Zeitpunkte der Quellenanalyse wurden im Bereich der MGFP-Maxima in den jeweiligen Messbereichen festgelegt und anhand ihrer MRT-Lokalisation im

Bereich des akustischen Kortex, bzw. nahe gelegener Gebiete, auf ihre Plausibilität überprüft. Dabei wurde unter Annahme eines aktiven Dipols mit dem Modell eines "single moving dipol" gearbeitet. Es wurde der Dipol mit der kleinsten Varianz bei gleichzeitig plausibler MRT-Lokalisation ausgewählt. Betrachtet wurden zudem ausschließlich Quellenlokalisationen mit einer Varianz von $< 10\%$ und einem zeitlich stabilen Dipol während mindestens 10 ms Dauer.

Für die Auswertung wurden folgende Parameter berücksichtigt: Zeitpunkt der besten Dipoldarstellung in Millisekunden (ms), Dipolstärke in Nano-Ampèremeter (nAm), Signal to Noise Ratio (SNR) und Quellenlokalisation im MRT-Bild. Daneben wurde bei der Komponente C1 die zeitliche Latenz vom Beginn des Triggersignal (entsprechend dem Simulusbeginn) bis zur ersten Aktivierung erfasst. Da bei den nachfolgenden Komponenten C2-C4 Zeitbereiche definiert wurden, konnten hier keine Latenzen bestimmt werden.

Die statistischen Angaben wurden mittels Anwendung eines Wilcoxon-Rangsummen-Vorzeichen-Tests für gepaarte Daten berechnet.

5. Ergebnisse

In der Gruppe 1 mit Muttersprache Deutsch wurden Daten von elf Probanden erhoben, von denen zehn in die Studie einbezogen werden konnten. Die MEG-Daten einer Person waren auf Grund eines Fehlers während der Koordinatentransformation nicht verwertbar.

In der Gruppe 2 mit Deutsch als Fremdsprache wurden sechs Personen untersucht und fünf in die Auswertung einbezogen. Wegen eines Fehlers bei der Signalaufzeichnung konnten die Daten eines Probanden nicht genutzt werden.

Zunächst erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse der Gruppe 1 (Deutsch als Muttersprache). Die Präsentation gliedert die Daten in die oben genannten Komponenten C1 - C4 der jeweiligen Zeitbereiche. Es werden nacheinander die Resultate der vier Untersuchungskategorien entsprechend untersuchter Hemisphäre und präsentierter Stimulusart aufgeführt. Exemplarisch werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungskategorien anhand der Resultate eines Probanden grafisch dargestellt (Butterflyplot, Dipolfeld und MRT-Lokalisation). Am Schluss des Abschnittes zu jeder Komponente erfolgt eine kurze, vergleichende Zusammenfassung der Teilergebnisse in diesem Zeitbereich.

Die Abkürzung „n.v.“ steht für „nicht verwertbar“ und bezeichnet diejenigen Untersuchungssequenzen, bei denen kein den Auswahlkriterien entsprechender Dipol gefunden werden konnte.

Als statistisch relevant wurden Ergebnisse mit einem p-Wert $< 0,05$ angenommen.

5.1 Probanden mit Muttersprache Deutsch (Gruppe 1)

5.1.1 Komponente C1 im Zeitbereich 90 - 130 ms

5.1.1.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 1: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)¹

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	111	17,9	5,3	G.front.inf.
Proband 2	107	23	8,1	G.temp.med.
Proband 3	93	37,4	7,8	G.front.inf.
Proband 4	105	25,2	6,4	G.front.inf.
Proband 5	103	37	2,9	G.front.inf.
Proband 6	93	9,3	1,9	G.front. suo
Proband 7	109	23	4,1	G.front.inf.
Proband 8	99	7,7	4,7	G.front.inf.
Proband 9	111	7,9	2,8	G.front.inf.
Proband 10	107	14,8	4	G.temp.sup.
Mittelwert	103,8	20,32	4,8	
SD	6,7	11	2,1	

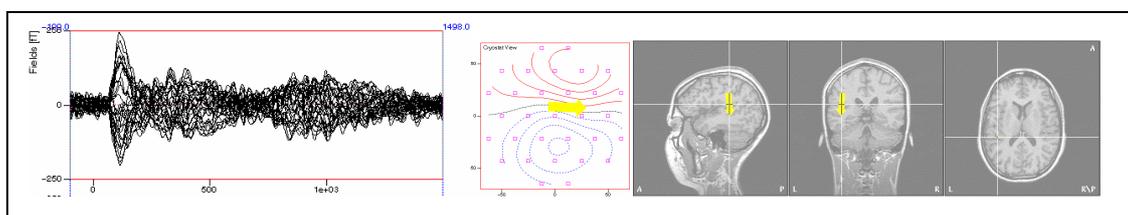


Abbildung 8: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 107 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

¹ Tabellen 1-39 (Ausnahmen: Tabellen 5, 10, 15, 20, 25, 30 und 35; siehe dort):

Tabellarische Darstellung der erfassten Einzelparameter Zeitpunkt des besten Dipolfits (ms), Dipolstärke (nAm), Signal to Noise Ratio (SNR) und MRT-Lokalisation mit jeweiligen Mittelwerten und Standardabweichungen (SD) für jeden Probanden der Gruppen 1 und 2 (ab Tabelle 21) in den verschiedenen Untersuchungskategorien: Linke Hemisphäre Wort-Präsentation (LW), linke Hemisphäre Invert-Wort-Präsentation (LIW), rechte Hemisphäre Wort-Präsentation (RW) und rechte Hemisphäre Invert-Wort-Präsentation (RIW) in den Komponenten C1-C4.

Alle Probanden zeigten in der Kategorie LW im angegebenen Zeitintervall eine Dipolaktivierung mit zeitlichem Mittelwert bei 103,8 ms. Die Dipolstärke variierte zwischen 7,7 und 37,4 nAm mit einer mittleren Signalstärke von 20,32 nAm. Die SNR lag bei allen Probanden mit Werten zwischen 1,9 und 8,1 (Mittelwert 4,8) deutlich über dem Hintergrundrauschen. Bei sieben von zehn Probanden ließ sich die Quelle der Aktivierung im Gyrus frontalis inferior, bei je einem Probanden im Gyrus temporalis superior und medius sowie bei einem Probanden im vorderen Bereich des Gyrus frontalis superior lokalisieren.

5.1.1.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 2: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	90	9,8	2,9	G.front.inf.
Proband 2	109	8,3	2,8	G.front.inf.
Proband 3	117	16	4,9	G.supramarginalis
Proband 4	121	7,4	3	G.front.inf.
Proband 5	123	10	2,7	G.front.inf.
Proband 6	130	6,8	2	G.front.med.
Proband 7	92	25,2	2,4	G.front.inf.
Proband 8	99	28,2	3,2	G.front.inf.
Proband 9	129	7,7	2,5	G.temp.sup.
Proband 10	101	17,7	2,4	G.temp.sup.
Mittelwert	111	13,7	2,9	
SD	15	7,8	0,8	

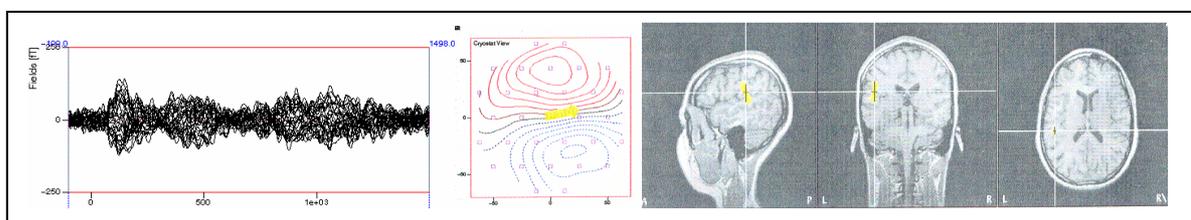


Abbildung 9: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 101 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Für die Kategorie LIW fanden zwischen 90 und 130 ms ebenfalls bei allen Probanden Dipolaktivierungen; der mittlere Zeitpunkt der Erregung lag bei 111 ms. Die mittlere Dipolstärke betrug 13,7 nAm. Das SNR variierte zwischen 2,4 und 4,9

und lag im Mittel 2,9-fach über dem Hintergrundrauschen. Als Quellenlokalisationen konnten bei sechs Probanden der Gyrus frontalis inferior, bei zwei weiteren der Gyrus temporalis superior und bei jeweils einer Person der Gyrus supramarginalis, bzw. der Gyrus frontalis medius benannt werden.

5.1.1.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 3: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	111	21,5	5,3	G.temp.sup.
Proband 2	99	12,2	4,2	G.temp.sup.
Proband 3	95	31	8,7	G.front.inf.
Proband 4	91	19,3	7	G.front.inf.
Proband 5	117	19,1	4,7	G.temp.sup.
Proband 6	109	10,6	5,1	G.front.inf.
Proband 7	85	6,9	4,1	G.temp.sup.
Proband 8	94	21,7	5,4	G.front.inf.
Proband 9	101	40	3,7	G.front.inf.
Proband 10	117	12,2	2,8	G.temp.sup.
Mittelwert	100,9	19,5	5,1	
SD	10	10	1,7	

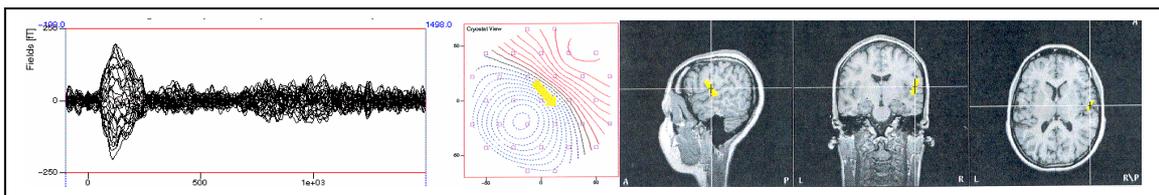


Abbildung 10: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW) mit Dipolfeld bei 117 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In der Kategorie RW fanden sich bei allen Untersuchten Aktivierungen. Der zeitliche Mittelwert lag bei 100,9 ms, vergleichbar mit dem zeitlichen Mittelwert der Kategorie LW im gleichen Zeitintervall. Die Streubreite der Dipolstärken betrug 6,9 bis 40 nAm; der Durchschnitt 19,5 nAm. Die SNR betrug 5,1 im Mittel. Die Lokalisationen der Aktivierungen fanden sich bei jeweils fünf Probanden im Gyrus temporalis superior und Gyrus frontalis inferior.

5.1.1.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 4: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	90	22	2,3	G.front.inf.
Proband 2	111	6,3	1,9	G.temp.med.
Proband 3	95	17,4	4,2	G.front.inf.
Proband 4	99	15,8	6,2	G.front.inf.
Proband 5	112	9,8	4,5	G.front.inf.
Proband 6	110	6,7	2,7	G.front.inf.
Proband 7	93	5	2,6	G.front.inf.
Proband 8	105	10,8	5,4	G.front.inf.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	115	3,1	2,3	G.front.inf.
Mittelwert	103,3	10,8	3,6	
SD	9,3	6,4	1,6	

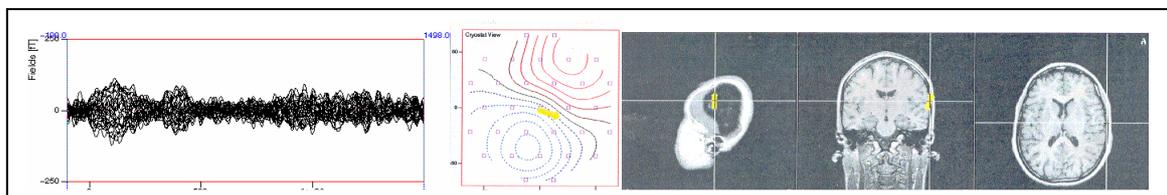


Abbildung 11: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW) mit Dipolfeld bei 115 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In dieser Untersuchungskategorie wurden bei neun von zehn Probanden verwertbare Signale gefunden, bei denen der mittlere Zeitpunkt der Aktivität bei 103,3 ms lag. Die Werte der Dipolstärken schwankten zwischen 3,1 und 22 nAm (Mittelwert 10,8, Standardabweichung 6,4). Die SNR lag im Durchschnitt bei 3,6. Die Ursprungsquellen der Signale wurden achtmal im Gyrus frontalis inferior und einmal im Gyrus temporalis medius gefunden.

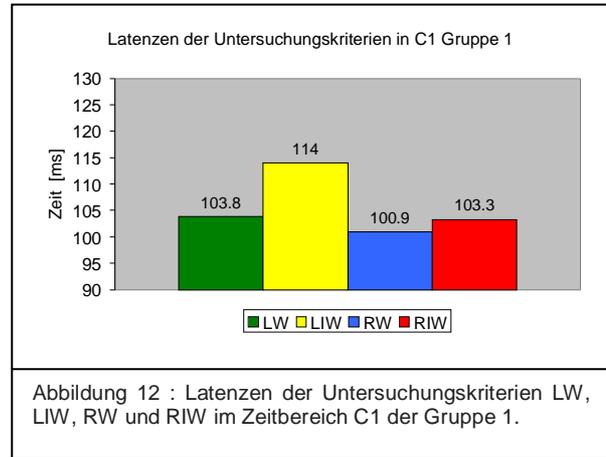
5.1.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C1

Bei fast allen Probanden und Untersuchungskategorien (eine Ausnahme in der Kategorie RIW) zeigten sich im Zeitbereich 90 – 130 ms in beiden Gehirnhälften Aktivierungen (siehe Tabelle 5).

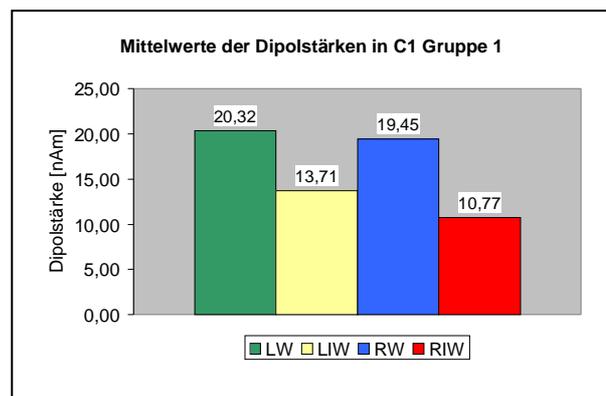
Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	10	10	10	9

Tabelle 5: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C1 der Gruppe 1.

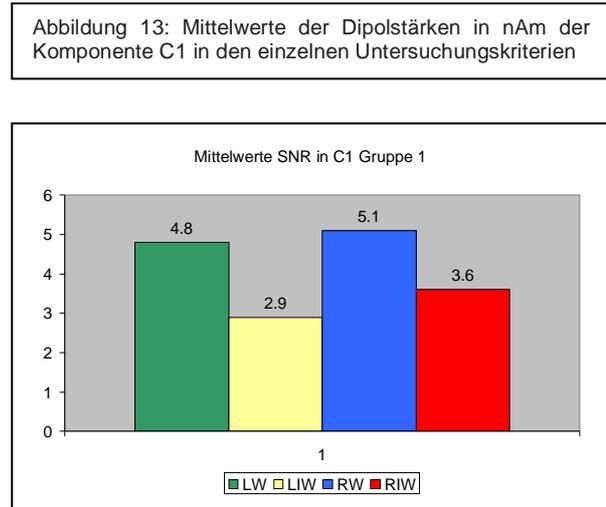
Die Untersuchung der Latenzen zeigte sowohl nach Wort-, als auch nach Invert-Wort-Präsentation eine geringfügig schnellere mittlere Aktivierung in der rechten Hemisphäre (siehe Abbildung 12).



Die Dipolstärke variierte individuell. Bei Betrachtung der Mittelwerte war bei Wort-Präsentation eine deutliche Erhöhung der Werte sowohl in der linken, als auch in der rechten Hemisphäre zu sehen (Abbildung 13). Dabei waren die Dipolstärken der Kategorie RW im Vergleich zu RIW signifikant erhöht ($p = 0,008$).



Beim Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) war die Signalstärke nach Wort-Präsentation in beiden Hemisphären signifikant erhöht (LW:LIW mit $p = 0,004$ und RW:RIW mit $p = 0,008$). Der Hemisphärenvergleich zeigte jedoch keinen signifikanten Unterschied (LW:RW mit $p = 0,531$). (Abbildung 14).



Die Quellenlokalisierungen der Dipole variierten deutlich. In den meisten Fällen fanden sich jedoch der Gyrus frontalis inferior, bzw. der Gyrus temporalis superior als Ursprung. Dies galt gleichermaßen für die linke, wie auch für die rechte Hemisphäre.

5.1.2 Komponente C2 im Zeitbereich 200 - 350 ms

5.1.2.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 6: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 2	300	12	3,4	G.front.inf.
Proband 3	312	35	4,5	G.front.inf.
Proband 4	296	25	3,1	G.front.inf.
Proband 5	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 6	320	6,8	2,8	G.front.inf.
Proband 7	230	35,8	3,1	G.front.inf.
Proband 8	216	21	2,6	G.front.inf.
Proband 9	206	12,7	2,7	G.front.inf.
Proband 10	278	25	3,4	G.temp.sup.
Mittelwert	269,8	21,7	3,2	
SD	45,5	10,7	0,6	

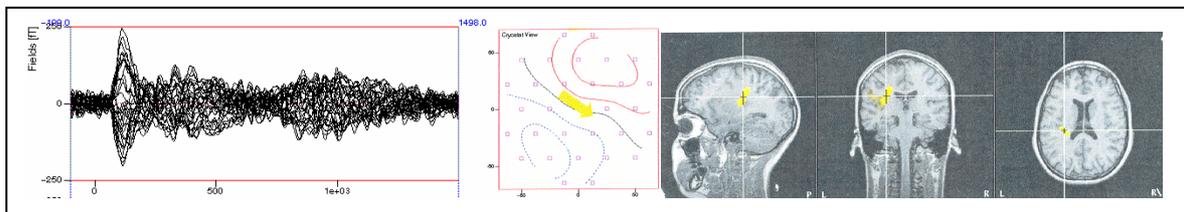


Abbildung 15: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 278 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In der Kategorie LW im Zeitbereich zwischen 200 und 350 ms fanden sich bei acht von zehn Probanden verwertbare Aktivierungen. Der mittlere Zeitpunkt lag bei 269,8 ms mit einer Standardabweichung von 45,5 ms. Die durchschnittliche Dipolstärke betrug 21,7 nAm, wobei die Werte zwischen 6,8 und 35,8 nAm variierten. Die SNR betrug im Mittel 3,2. Die Quellenlokalisierung ergab in sieben Fällen den Gyrus frontalis inferior und einmal den Gyrus temporalis superior.

5.1.2.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 7: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 2	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 3	200	12,5	3	G.temp.sup.
Proband 4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 5	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 6	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 7	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	248	13,7	3	G.front.inf.
Proband 10	275	23,1	3,2	G.front.inf.
Mittelwert	241	16,4	3,1	
SD	38	5,8	0,1	

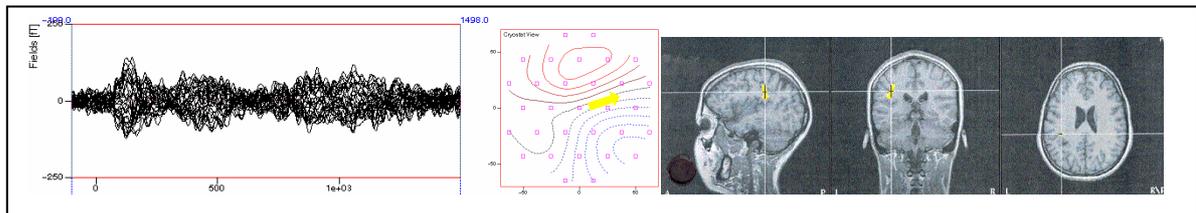


Abb. 16: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 275 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

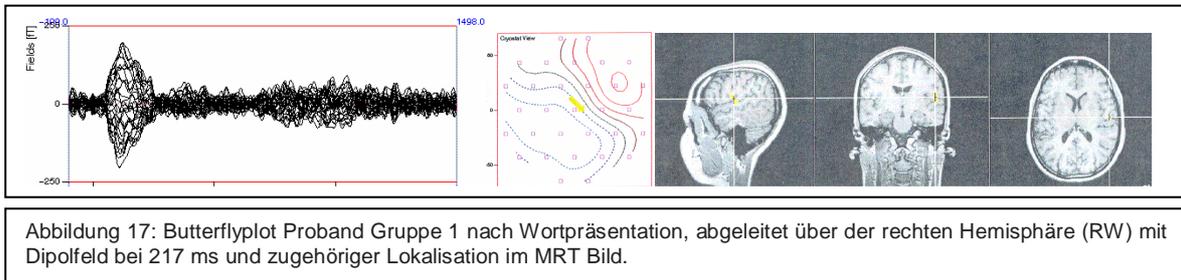
Bei der Untersuchung der Daten in der Kategorie LIW konnte lediglich bei drei von zehn Probanden eine Dipolaktivierung gefunden werden, welche die unter 3.7. genannten Auswahlkriterien erfüllte. Die drei Dipole erschienen bei einem zeitlichen Mittelwert von 241 ms (Standardabweichung 38 ms).

Die mittlere Dipolstärke betrug 16,4 nAm, wobei eine Standardabweichung von 5,8 nAm vorlag. Die SNR betrug im Durchschnitt 3,1. Die Dipole wurden einmal im Gyrus temporalis superior und zweimal im Gyrus frontalis inferior lokalisiert.

5.1.2.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 8: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	234	12,4	4	G.temp.sup.
Proband 2	292	26,1	3,2	G.front.inf.
Proband 3	225	9,2	3,2	G.temp.sup.
Proband 4	209	33,7	4,9	G.front.inf.
Proband 5	211	16,5	4,7	G.temp.sup.
Proband 6	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 7	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	217	16,5	4,3	G.temp.sup.
Mittelwert	231,3	19,1	4,1	
SD	31,1	9,1	0,7	



Es konnten in dieser Untersuchungskategorie Dipole von sechs Probanden ausgewertet werden. Der mittlere Zeitpunkt des Auftretens lag bei 231,3 ms, die mittlere Dipolstärke betrug 19,1 nAm, mit einer durchschnittlichen SNR von 4,1. Dabei wurden vier Signale im Gyrus temporalis superior und zwei im Gyrus frontalis inferior lokalisiert.

5.1.2.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 9: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	269	5,3	2,4	G.temp.sup.
Proband 2	329	33,8	2,8	G.front.inf.
Proband 3	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 5	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 6	268	6,9	8,4	G.temp.sup.
Proband 7	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	317	3,5	3,1	G.temp.sup.
Mittelwert	295,8	12,4	4,2	
SD	31,8	14,4	2,8	

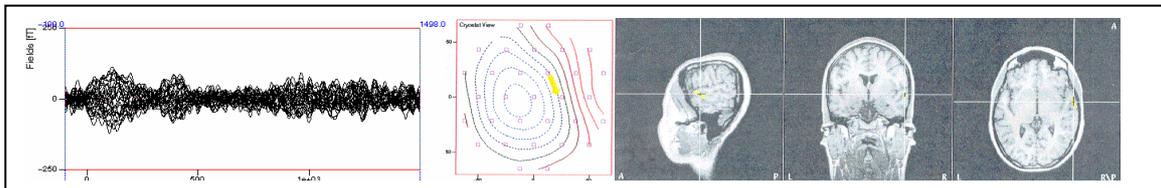


Abbildung 18: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW) mit Dipolfeld bei 317 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Vergleichbar wie bereits bei LIW konnten auch in der Untersuchungskategorie RIW insgesamt nur vier Dipole in die Auswertung mit einbezogen werden. Der durchschnittliche Aktivierungszeitpunkt lag bei 295,8. Die Dipolstärken variierten zwischen 3,5 und 33,8 nAm mit einem Mittelwert von 12,4 nAm bei einem durchschnittlichen Signal-Rausch-Verhältnis von 4,2.

Drei der Dipole wurden im Gyrus temporalis superior und einer im Gyrus frontalis inferior lokalisiert.

5.1.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C2

Die Anzahl der gefundenen Dipolaktivierungen war in diesem Zeitbereich deutlich geringer als im Zeitintervall C1. Besonders in den Kategorien Invert-Wort beider Hemisphären (LIW und RIW) war die Anzahl der auswertbaren Signale mit drei, bzw. vier Dipolen deutlich niedriger als in den Wort-Kategorien (siehe Tabelle 10).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	8	3	6	4

Tabelle 10: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C2 der Gruppe 1.

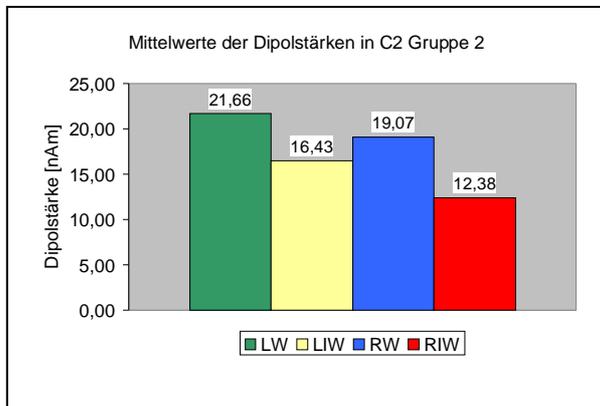


Abbildung 19: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C2 der einzelnen Untersuchungskategorien

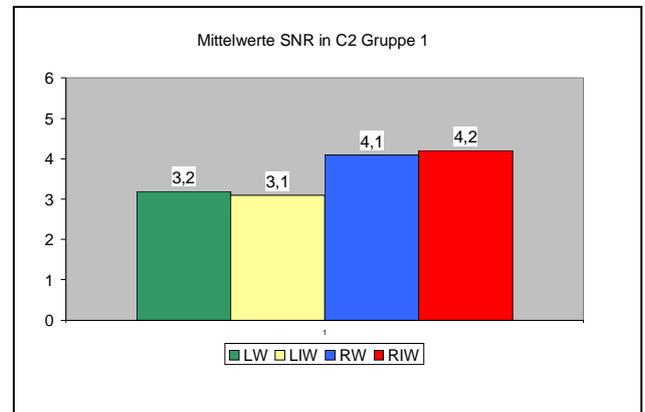


Abbildung 20: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C2 der einzelnen Untersuchungskategorien

Wie auch in C1 beschrieben, fand sich im Zeitabschnitt 200 – 350 ms eine Erhöhung der mittleren Dipolstärke in den Wort-Kategorien (siehe Abbildung 19), ohne dass ein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden konnte. Bei SNR-Werten zwischen 3,1 und 4,2 zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Signalintensitäten (Abbildung 20).

Die Lokalisationsergebnisse stellten sich unterschiedlich zu denen der Komponente C1 dar. In der Kategorie LW dominierte erneut der Gyrus frontalis inferior. Der Gyrus temporalis superior und der Gyrus frontalis inferior zeigten sich in den anderen Kategorien als Ursprungsorte.

5.1.3 Komponente C3 im Zeitbereich 400 - 500 ms

5.1.3.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 11: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	377	14,8	2,9	G.front.inf.
Proband 2	437	19,2	2,9	G.temp.inf.
Proband 3	498	16,2	3,2	G.temp.sup.
Proband 4	498	9	3,2	G.front.inf.
Proband 5	423	34,2	3,3	G.front.inf.
Proband 6	521	5	2,4	G.frontalis
Proband 7	408	14,7	3	G.temp.inf.
Proband 8	414	14,1	2,8	G.temp.inf.
Proband 9	428	11	3,2	G.temp.sup.
Proband 10	421	29	3,5	G.temp.sup.
Mittelwert	442,5	16,7	3	
SD	46,8	8,9	0,3	

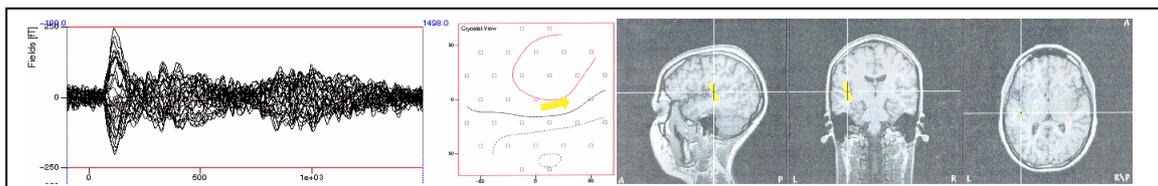


Abbildung 21: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 421 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In der Untersuchungskategorie linke Hemisphäre Wort fanden sich bei allen Probanden Dipolaktivierungen im angegebenen Zeitbereich. Im Mittel fand sich bei 442,5 ms eine Aktivität, bei einer durchschnittlichen Dipolstärke von 16,7 nAm (Standardabweichung 8,9 nAm). Die SNR variierte zwischen 2,4 und 3,5 (Mittelwert 3,0). Der Ort der Quellenlokalisierung fand sich bei sechs Probanden im Gyrus frontalis inferior, bei drei weiteren im Gyrus temporalis superior und bei einem Probanden weit frontal im Gyrus frontalis.

5.1.3.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 12: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	429	15	3,3	G.front.inf.
Proband 2	437	12,3	4,1	G.temp.sup.
Proband 3	393	18,6	3,3	G.front.inf.
Proband 4	475	7,9	2,1	G.front.inf.
Proband 5	467	19	2	G.front.inf.
Proband 6	398	7,6	4,5	G.front.inf.
Proband 7	385	14,1	2,4	G.front.inf.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	417	22,2	2,1	G.front.inf.
Proband 10	435	16,8	2,5	G.temp.sup.
Mittelwert	426,2	14,8	2,9	
SD	31,5	5	0,9	

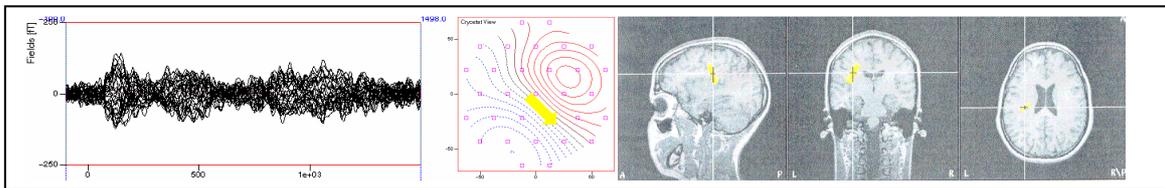


Abbildung 22: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 435 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Die bei neun Probanden gefundenen Quellen präsentierten sich mit 426,2 ms. Die Dipolstärke erreichte im Mittel 14,8 nAm (Standardabweichung: 5,0 nAm) und war damit im Durchschnitt etwas niedriger als in der Kategorie LW. Die Signalintensität lag bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 2,9. Bei sieben Probanden war die Quelle der Aktivierung im Gyrus frontalis inferior, bei zwei im Gyrus temporalis superior zu finden.

5.1.3.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 13: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	409	17	2,4	G.front.inf.
Proband 2	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 3	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 5	489	33,8	3,8	G.front.inf.
Proband 6	489	8	4,7	G.front.inf.
Proband 7	438	6,4	3,8	G.front.inf.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	435	10,6	2,9	G.front.inf.
Proband 10	398	3,6	2,8	G.front.inf.
Mittelwert	443	13,2	3,4	
SD	38,7	11,1	0,9	

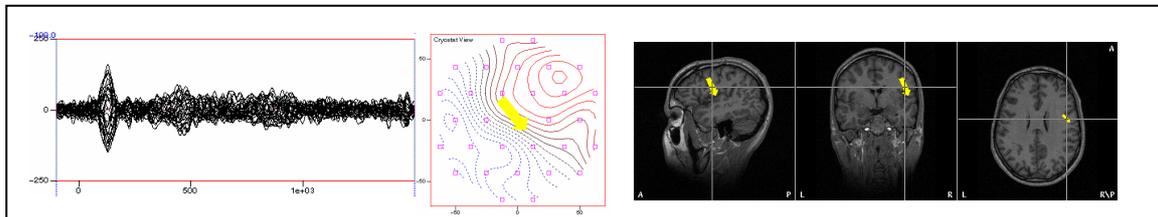


Abbildung 23: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW) mit Dipolfeld bei 398 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In dieser Kategorie konnten sechs Aktivierungen ausgewertet werden. Der mittlere Erscheinungszeitpunkt des Dipols betrug 443 ms mit einer Standardabweichung von 38,7 ms. Die mittlere Dipolstärke betrug 13,2 nAm, bei einer durchschnittlichen SNR von 3,4. Der Gyrus frontalis inferior war bei allen Probanden Ursprungsort der Aktivierung.

5.1.3.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 14: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 2	453	22	2,2	G.temp.sup.
Proband 3	375	10,2	3,1	G.front.inf.
Proband 4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 5	404	18	3,6	G.front.inf.
Proband 6	477	5,9	3,2	G.front.inf.
Proband 7	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	381.	8,9	3,1	G.temp.sup.
Mittelwert	418	13	3	
SD	45,1	6,7	0,5	

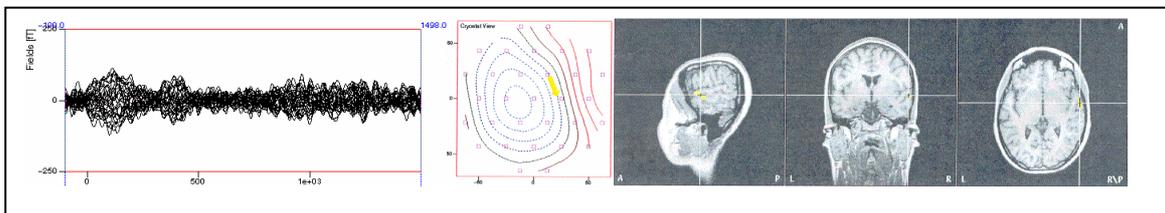


Abbildung 24: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW) mit Dipolfeld bei 381 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Erneut konnten nicht bei allen Probanden Dipole gefunden werden, so dass nur fünf Aktivierungen in die Auswertung einbezogen wurden. Der durchschnittliche Zeitpunkt des Auftretens des Signals lag bei 418 ms, bei einer mittleren Dipolstärke von 13,0 nAm und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 3,0.

Die Lokalisation fand sich dabei in drei Fällen im Gyrus frontalis inferior und zweimal im Gyrus temporalis superior.

5.1.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C3

In der linken Hemisphäre traten deutlich mehr Aktivierungen (LW: 10; LIW: 9) als in der rechten Hemisphäre (RW: 6; RIW: 5) auf (vergleiche Tabelle 15).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	10	9	6	5

Tabelle 15: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C3 der Gruppe 1

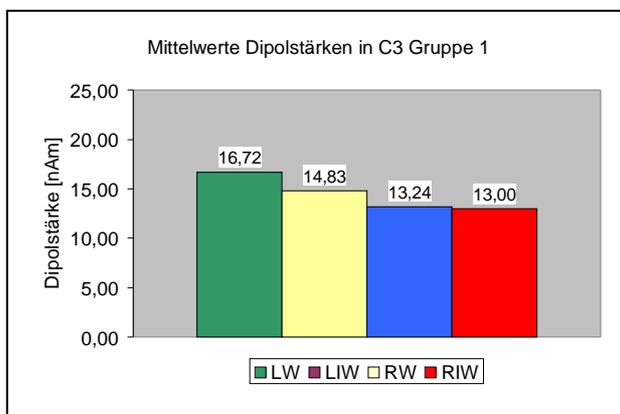


Abbildung 25: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C3 in den einzelnen Untersuchungskategorien

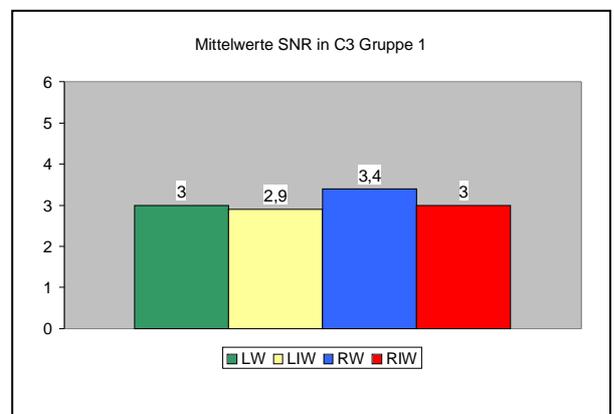


Abbildung 26: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C3 Gruppe 1 in den einzelnen Untersuchungskategorien

In beiden Hemisphären zeigten sich in der Kategorie Wort zu sehr ähnlichen Zeitpunkten Aktivitäten (Mittelwerte: LW 442 ms; RW 443 ms). Auch in der Kategorie Invert-Wort waren die durchschnittlichen Aktivierungszeitpunkte mit 426 ms für LIW und 418 ms für RIW ähnlich.

Die mittleren Dipolstärken sind in Abbildung 25 dargestellt. Für die linke Hemisphäre waren die durchschnittlichen Werte zwar höher als für die rechte, aber ein statistisch signifikanter Unterschied konnte nicht ermittelt werden.

Ebenso zeigte sich bei den mittleren Signal-Rausch-Verhältnissen kein statistischer Unterschied (Abbildung 26).

Die Quellenlokalisationen wurden in beiden Gehirnhälften zum überwiegenden Teil im Gyrus frontalis inferior, vereinzelt auch im Gyrus temporalis superior gefunden.

5.1.4 Komponente C4 im Zeitbereich 800 - 1200 ms

5.1.4.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 16: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	1029	13	2,7	G.front.inf.
Proband 2	925	17	2,6	G.temp.sup.
Proband 3	955	26	7,2	G.front.inf.
Proband 4	1029	16	2,9	G.temp.sup.
Proband 5	1051	25,6	2,6	G.temp.sup.
Proband 6	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 7	1069	10,7	2,4	G.front.inf.
Proband 8	985	9	3,1	G.front.inf.
Proband 9	895	30,8	3	G.front.inf.
Proband 10	979	19,8	3,1	G.front.inf.
Mittelwert	990,8	18,7	3,3	
SD	58,8	7,5	1,5	

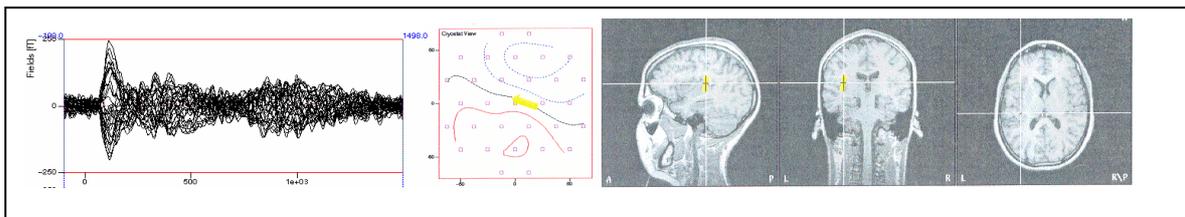


Abbildung 27: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 979 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In dieser Kategorie konnten Daten von neun Probanden in die Auswertung einbezogen werden. Bei einem mittleren Zeitpunkt der Aktivierung von 990,8 ms und einer durchschnittlichen SNR von 3,3 variierten die Dipolstärken zwischen 9,0 und 30,8 nAm (Mittelwert 18,7 nAm mit einer Standardabweichung von 7,5 nAm). Als Lokalisationsort der Dipole ergaben sich bei drei Probanden der Gyrus temporalis superior und bei sechs Probanden der Gyrus frontalis inferior.

5.1.4.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 17: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	977	9,5	3,1	G.temp.med.
Proband 2	975	6,4	2,5	G.temp.med.
Proband 3	832	12,8	3,6	G.front.inf.
Proband 4	898	12,8	2,8	G.front.inf.
Proband 5	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 6	983	26	2,4	G.front.inf.
Proband 7	739	19	2,5	G.front.inf.
Proband 8	867	6,5	2,3	G.front.inf.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	965	15	2,4	G.front.inf.
Mittelwert	904,5	13,5	2,7	
SD	87,9	6,6	0,4	

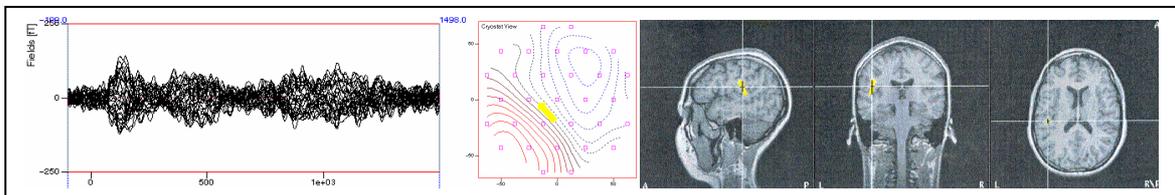


Abbildung 28: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 965 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Auch in der Kategorie LIW konnten Daten von acht Probanden ausgewertet werden. Hier lag der Mittelwert des Auftretens bei 904,5 ms. Die durchschnittliche Dipolstärke betrug 13,5 nAm. Die mittlere SNR lag bei 2,7. Die Dipole ließen sich in sechs Fällen im Gyrus frontalis inferior und zweimal im Gyrus temporalis medius lokalisieren.

5.1.4.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 18: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	867	8,4	2,7	G.temp.sup.
Proband 2	901	12,1	2,3	G.temp.sup.
Proband 3	961	6	3,1	G.front.inf.
Proband 4	937	16,7	2,9	G.front.inf.
Proband 5	1019	35,5	3,3	G.front.inf.
Proband 6	891	4	3	G.front.inf.
Proband 7	941	3,2	2,4	G.front.inf.
Proband 8	933	15,4	2	G.front.inf.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	959	28,8	3,2	G.front.inf.
Mittelwert	934,3	14,5	2,8	
SD	44,8	11,2	0,5	

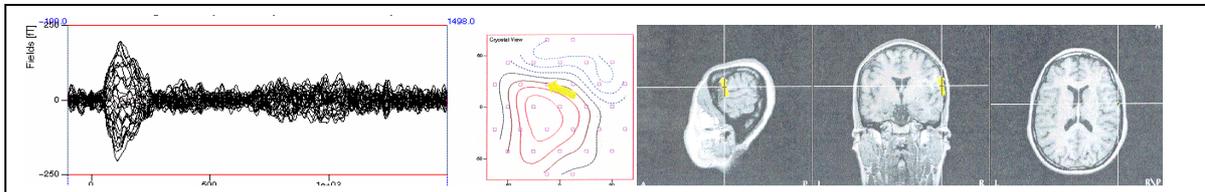


Abbildung 29: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW) mit Dipolfeld bei 959 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Der Mittelwert der Aktivierung bei den hier mit einbezogenen neun Probanden betrug 934,3 ms (Standardabweichung: 44,8 ms). Die durchschnittliche Dipolstärke betrug 14,5 nAm mit einer Standardabweichung von 11,2 nAm. Die SNR war im Durchschnitt, ebenso wie bei den anderen Untersuchungskategorien in diesem Zeitintervall, mit 2,8 relativ niedrig. Sieben der neun Dipole waren im Gyrus frontalis inferior, zwei im Gyrus temporalis superior lokalisiert.

5.1.4.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 19: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband 1	935	25	2,5	G.front.inf.
Proband 2	1029	12,2	2,9	G.temp.sup.
Proband 3	889	5,4	2,8	G.front.inf.
Proband 4	1073	3,8	3	G.front.inf.
Proband 5	1051	7,6	3	G.temp.sup.
Proband 6	1047	7,6	3,2	G.front.inf.
Proband 7	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 8	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 9	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband 10	983	39	2	G.front.inf.
Mittelwert	1004	14,4	2,9	
SD	68,1	13	0,4	

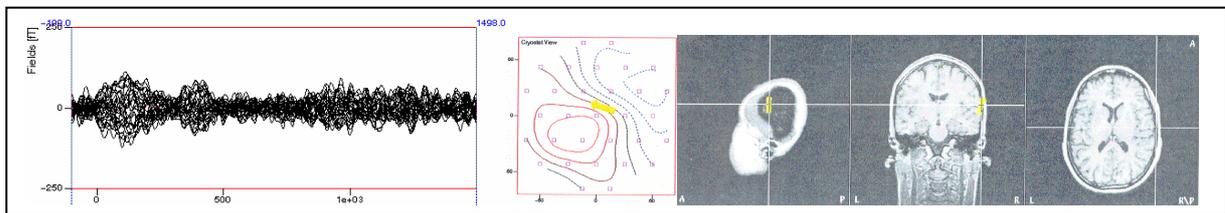


Abbildung 30: Butterflyplot Proband Gruppe 1 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW) mit Dipolfeld bei 983 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Die sieben gefundenen Dipole traten mit einem zeitlichen Mittelwert von 1004 ms auf. Die Dipolstärke war durchschnittlich 14,4 nAm hoch, die SNR wie bei den restlichen Kategorien in der Komponente C3 mit 2,9 relativ gering. Als Quellenlokalisierung konnten erneut bei fünf Probanden der Gyrus frontalis inferior und zweimal der Gyrus temporalis superior gefunden werden.

5.1.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C4

Insgesamt fanden sich beim überwiegenden Teil der zehn Probanden Dipole im Zeitintervall von 800 bis 1200 ms (vergleiche Tabelle 20).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	9	8	9	7

Tabelle 20: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C4 der Gruppe 1

Die mittlere Dipolstärke, dargestellt in Abbildung 31, zeigt eine (statistisch nicht relevante) Erhöhung in der Kategorie LW bei ansonsten vergleichbarer Intensität den anderen Kategorien.

Auch bei den mittleren SNR-Werten zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede (Abbildung 32).

Auf Grund des relativ großen Zeitintervalls fanden sich starke Unterschiede im zeitlichen Auftreten der Dipole, wodurch eine Bewertung erschwert wurde.

Ebenso wie bei allen anderen Komponenten war die hauptsächliche Lokalisation der Aktivierung im Gyrus frontalis inferior zu finden, was sowohl für die linke, als auch für die rechte Hemisphäre zutraf.

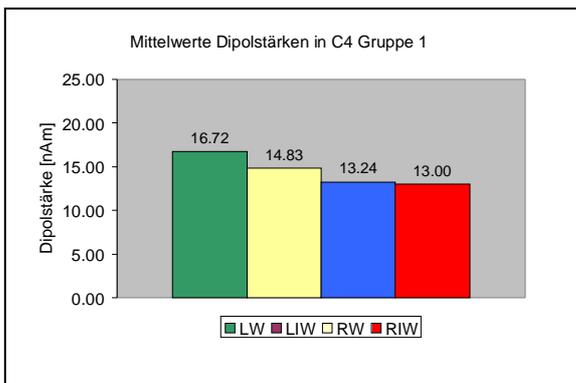


Abbildung 31: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C4 in den einzelnen Untersuchungskategorien

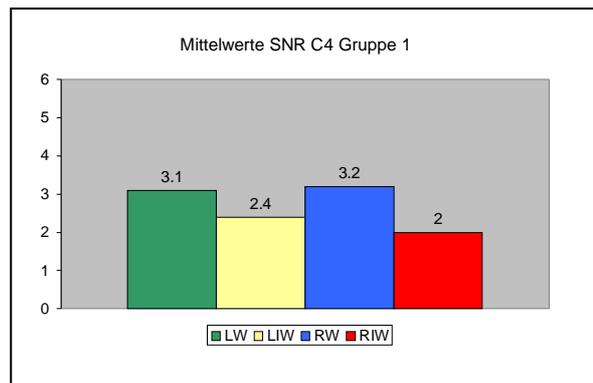


Abbildung 32: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C4 Gruppe 1 in den einzelnen Untersuchungskategorien

5.2 Probanden mit Deutsch als Fremdsprache (Gruppe 2)

5.2.1 Komponente C1 im Zeitbereich 90 - 130 ms

5.2.1.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 21: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	100	15,5	3,8	G.front.inf.
Proband B	105	16,2	4,7	G.front.inf.
Proband C	93	5,8	3	G.front.inf.
Proband D	103	31,5	3,2	G.front.inf.
Proband E	113	12,8	3,2	G.front.inf.
Mittelwert	102	16,36	3,58	
SD	7,26	9,4	0,69	

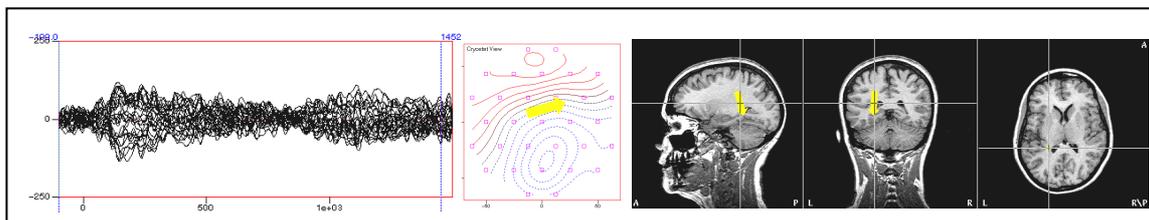


Abbildung 33: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 100 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Bei der Untersuchung in dieser Gruppe, konnte bei allen Probanden eine Dipolaktivierung gefunden werden. Im Mittel war der Zeitpunkt der Erregung bei 102 ms zu finden (Standardabweichung 7,26 ms). Die Dipolstärke betrug durchschnittlich 16,36 nAm. Das Signal-Rausch-Verhältnis lag im Mittel bei 3,58. Die fünf Aktivitäten fanden sich alle im Gyrus frontalis inferior.

5.2.1.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 22: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	90	5,9	2,5	G.temp.sup.
Proband B	101	7,7	3	G.front.inf.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	129	7,81	2,4	G.temp.sup.
Proband E	128	17,3	2,6	G.front.inf.
Mittelwert	112	9,87	2,6	
SD	19,58	5,16	0,26	

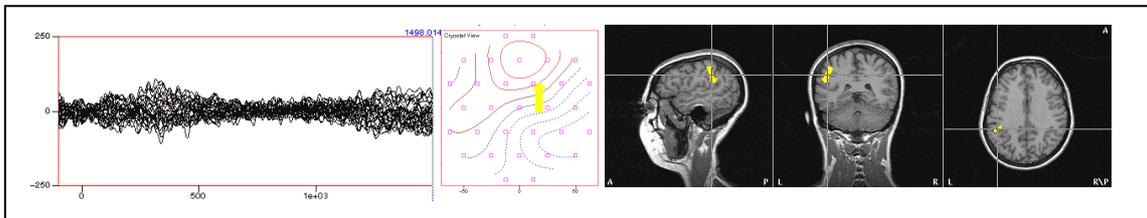


Abbildung 34: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 90 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Es zeigten sich bei vier von fünf Probanden Dipolerregungen. Der mittlere Aktivierungszeitpunkt in der Kategorie LIW lag bei 112 ms.

Die Dipolstärke in nAm lag bei 9,87 Auch die SNR war mit 2,6 deutlich geringer als in den anderen Kategorien. Es fanden sich sowohl der Gyrus temporalis superior, als auch der Gyrus frontalis inferior als Ursprungsort der Quellen.

5.2.1.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 23: Probandendaten abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	98	6,2	2,9	G.temp.sup.
Proband B	95	17,4	3,7	G.front.inf.
Proband C	90	22	2,1	G.front.inf.
Proband D	127	13,2	3,4	G.front.inf.
Proband E	123	18,1	2,1	G.front.inf.
Mittelwert	106,6	15,38	2,84	
SD	17,1	6,01	0,73	

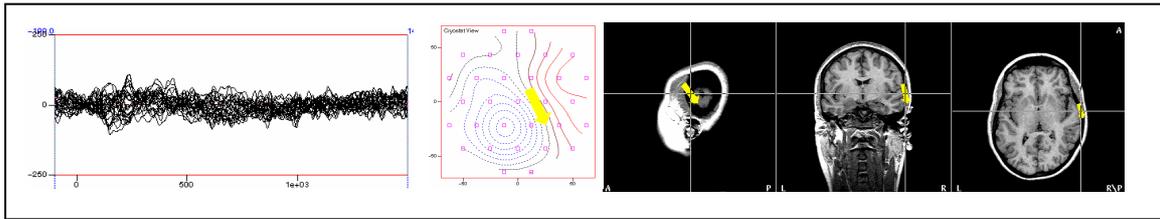


Abbildung 35: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW) mit Dipolfeld bei 98 ms und zuehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Bei allen Probanden fanden sich Dipole, wobei die Durchschnittswerte für den Aktivierungszeitpunkt bei 106 ms, für die Dipolstärke bei 15,38 nAm lagen, und die Streubreite relativ groß war (Standardabweichung 6,01 nAm). Für die SNR fand sich ein Mittelwert von 2,8. Als Ursprungsorte der Erregung waren die Gyri temporalis superior und frontalis inferior zu erkennen.

5.2.1.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 24: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	93	3	2,1	G.temp.sup.
Proband B	107	8,2	8,9	G.front.inf.
Proband C	103	15	3,2	G.front.inf.
Proband D	118	25,3	2,6	G.temp.sup.
Proband E	107	6,4	8,5	G.front.inf.
Mittelwert	105,6	11,58	5,06	
SD	8,99	8,83	3,35	

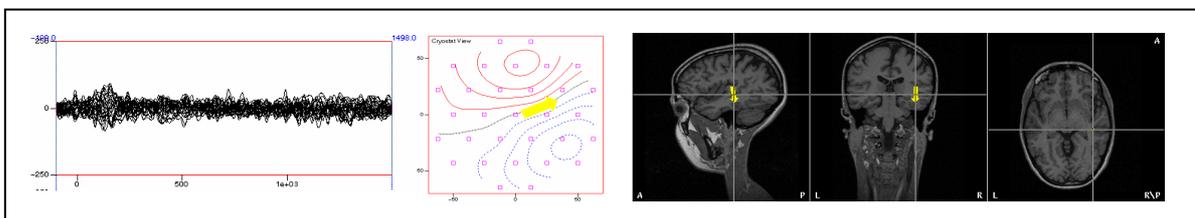


Abbildung 36: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW) mit Dipolfeld bei 107 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Die bei den fünf Probanden gefundenen Erregungen in dieser Untersuchungsgruppe fanden sich im Mittel bei 105,6 ms, bei einer Dipolstärke von 11,58 nAm und einer SNR von 5,06. Lokalisiert wurden die Aktivitäten wie

schon in den anderen Untersuchungskategorien in den Gyri temporalis superior und frontalis inferior.

5.2.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C1

Ebenso wie in der ersten Probandengruppe, fanden sich auch hier bei fast allen Untersuchten Aktivierungen. Diese erste Komponente trat sowohl in der Wort-, wie auch in der Invert-Wort-Kategorie in beiden Hemisphären auf (siehe Tabelle 25).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	5	4	5	5

Tabelle 25: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C1 der Gruppe 2

Anders als in der Gruppe 1 zeigten sich jedoch im Hemisphärenvergleich keine Unterschiede in der zeitlichen Verarbeitung, bzw. war kein signifikanter Unterschied bei den Latenzen nachzuweisen (siehe Abbildung 37).

Die Dipolstärken variierten, wie auch in der Komponente C1 der „Muttersprachler“, relativ stark, jedoch ohne statistisch signifikanten Unterschied. Es fand sich außerdem, ebenso wie bei der Gruppe 1 beschrieben, eine relative Erhöhung der Dipolstärken in den Kategorien Wort im Vergleich zu den Invert-Wort-Kategorien (siehe Abbildung 38).

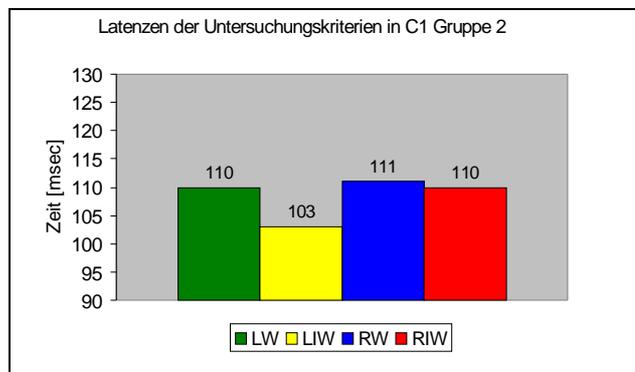


Abbildung 37: Latenzen der Untersuchungskriterien LW, LIW, RW, und RIW im Zeitbereich C1 der Gruppe 2

Eine solche Erhöhung konnte bei den Signal-Rausch-Verhältnissen nicht beschrieben werden (siehe Abbildung 39). Eine statistische Aussage war bei der geringen Probandenzahl leider nicht möglich.

Bei der Lokalisation fand sich, ebenso wie in Gruppe 1 beschrieben, meist der Gyrus frontalis inferior als Ursprungsort der Aktivierung.

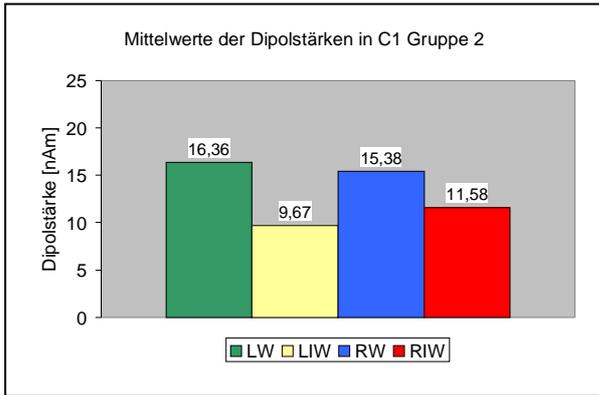


Abbildung 38: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C1 in den einzelnen Untersuchungskategorien

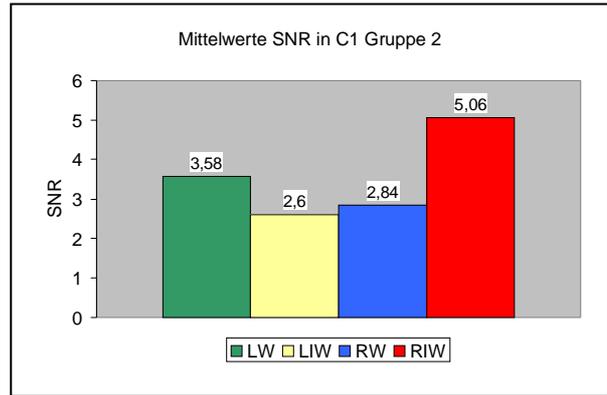


Abbildung 39: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C1 Gruppe 2 in den einzelnen Untersuchungskategorien

5.2.2 Komponente C2 im Zeitbereich 200 - 350 ms

5.2.2.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 26: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	218	14,1	3,8	G.front.inf.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	190	12,5	3,3	G.front.inf.
Proband D	288	28,7	3,6	G.front.inf.
Proband E	267	6,57	3,3	G.temp.sup.
Mittelwert	240,75	15,47	3,5	
SD	44,77	9,4	0,24	

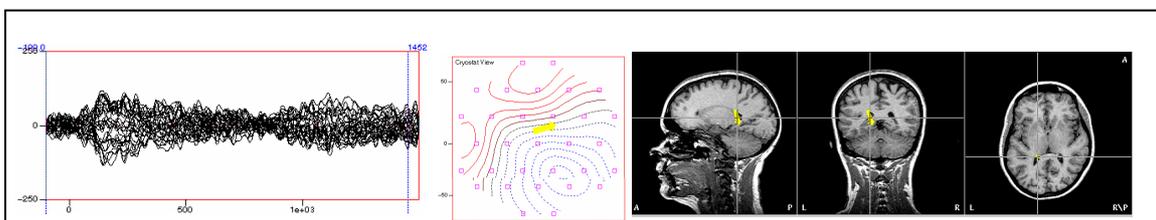


Abbildung 40: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 218 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In der Kategorie LW fand sich bei vier von fünf Probanden eine Aktivierung im Mittel bei 240,75 ms mit einer Dipolstärke von 15,47 nAm bei einer

durchschnittlichen SNR von 3,5. Bei den Lokalisationsorten dominierte in dieser Untersuchungskategorie der Gyrus frontalis inferior.

5.2.2.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 27: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	218	5	2,6	G.temp.sup.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	185	11,5	2,3	G.front.inf.
Proband D	273	10,2	2,1	G.front.inf.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Mittelwert	225,33	8,9	2,33	
SD	44,46	3,44	0,25	

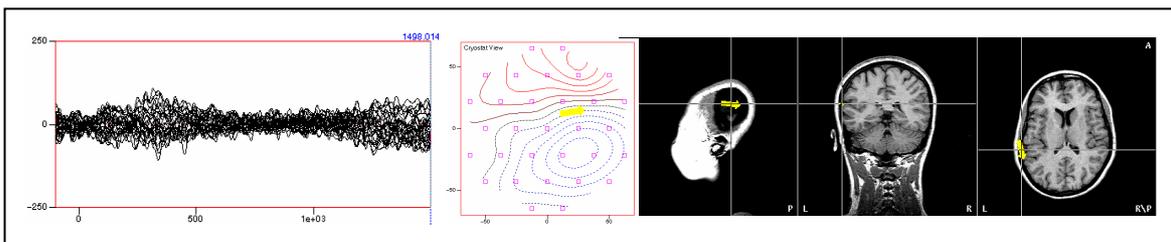


Abbildung 41: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 218 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild

Bei drei Probanden zeigten sich Dipolerrregungen, mit einer mittleren Dipolstärke von 8,9 nAm und einem relativ niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis von 2,33. Sowohl der Gyrus temporalis superior, als auch der Gyrus frontalis inferior waren als Ursprungsorte der Aktivierungen zu finden.

5.2.2.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 28: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Es waren in der Untersuchungskategorie RW der Gruppe 2 keine Erregungen im Sinne der definierten Auswahlkriterien zu finden.

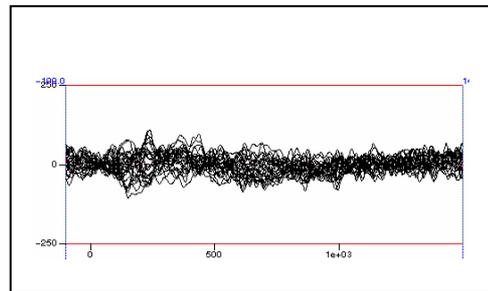


Abbildung 42: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW).

5.2.2.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 29: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Auch in der Kategorie RIW zeigten sich keine Dipolaktivierungen im Sinne der Auswahlkriterien im Zeitbereich 200 – 350 ms.

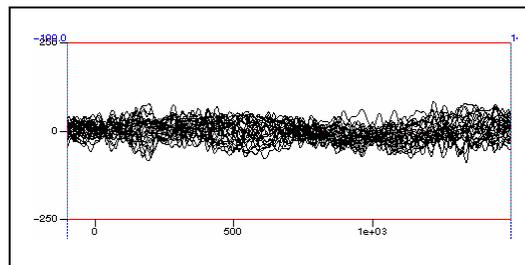


Abbildung 43: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW).

5.2.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C2

Im Zeitbereich von 200 bis 350 ms fanden sich ausschließlich in der linken Hemisphäre Aktivierungen (siehe Tabelle 30).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	4	3	0	0

Tabelle 30: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C2 der Gruppe 2.

Die Dipolstärke der Wort-Kategorie war deutlich höher als in der Invert-Wort-Gruppe (15,47 nAm zu 8,9 nAm). Die rechte Hemisphäre zeigte für beide Stimulustypen (Wort und invertierte Wore) keine Erregung im Sinne der Auswahlkriterien (Abbildung 44).

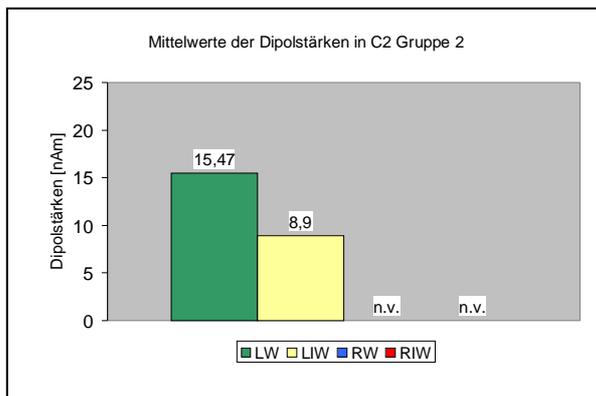


Abbildung 44: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C2 Gruppe 2 in den einzelnen Untersuchungskategorien

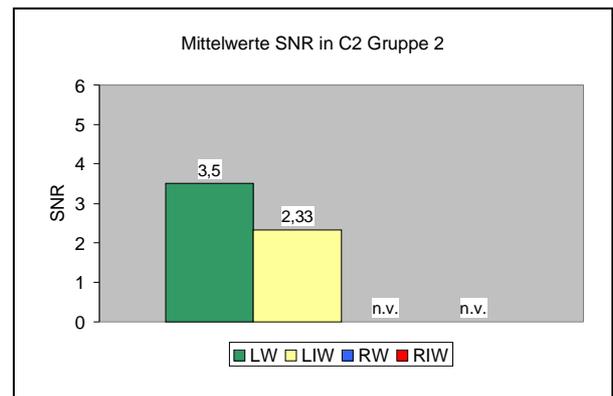


Abbildung 45: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C2 Gruppe 2 in den einzelnen Untersuchungskategorien

Im Vergleich zu diesen Ergebnissen fand sich in der Gruppe der „Muttersprachler“ eine leichte Erhöhung bei Dipolstärke und Anzahl gefundener Dipole in den Wort-Kategorien gegenüber den Invert-Wort-Kategorien beider Gehirnhälften.

Vergleichbare Ergebnisse wie bei den Dipolstärken zeigten sich bei den Signal-Rausch-Verhältnissen (Abbildung 45). In beiden Probandengruppen konnte der Gyrus frontalis inferior als häufigster Ursprungsort lokalisiert werden.

5.2.3. Komponente C3 im Zeitbereich 400 - 500 ms

5.2.3.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 31: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	448	9,8	2,6	G.temp.sup.
Proband B	487	19	4,6	G.temp.sup.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	414	7,84	3,5	G.temp.sup.
Proband E	412	7,19	2,9	G.front.inf.
Mittelwert	440,25	10,96	3,4	
SD	35,27	5,48	0,88	

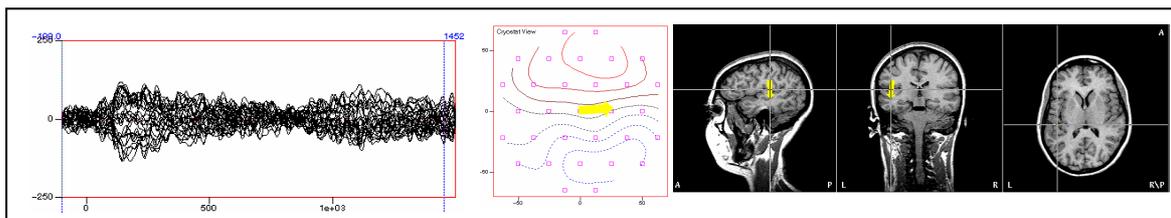


Abbildung 46: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 448 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Die vier gefundenen Aktivierungen traten zu einem mittleren Zeitpunkt von 440 ms auf. Die Dipolstärke betrug 10,96 nAm. Bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 3,4 fanden sich drei von vier Signalen im Gyrus temporalis superior.

5.2.3.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 32: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	437	4	2,8	G.temp.sup.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	469	14,9	2	G.temp.sup.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Mittelwert	453	9,45	2,4	
SD	22,63	7,71	0,57	

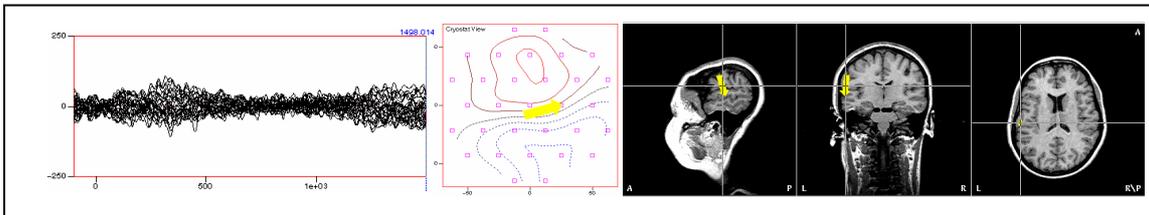


Abbildung 47: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW) mit Dipolfeld bei 437ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

In der Kategorie LIW war lediglich bei zwei Probanden ein Signal bei durchschnittlich 453 ms, jeweils im Gyrus temporalis superior, zu finden. Es zeigte sich eine mittlere Dipolstärke von 9,45 nAm und eine relativ geringes SNR von 2,4

5.2.3.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 33: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

RW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Erläuterungen siehe 5.2.3.4.

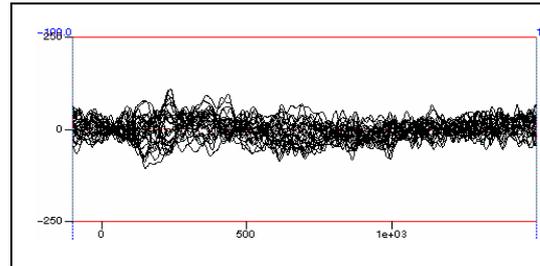


Abbildung 48: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW).

5.2.3.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 34: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	

Wie schon bei der Komponente C2, war auch in den Kategorien RW und RIW im Zeitbereich 400 bis 500 ms keine Aktivierung im Sinne der Auswahlkriterien zu finden.

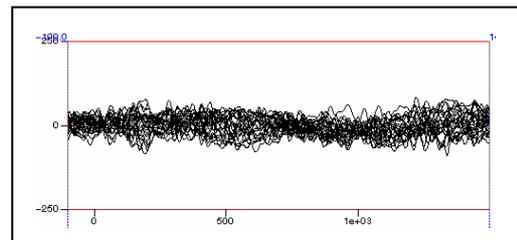


Abbildung 49: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW).

5.2.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C3

Erneut konnten Aktivierungen im Sinne der Auswahlkriterien ausschließlich in der linken Hemisphäre gefunden werden. Dabei war die Anzahl der Dipolerregungen in der Kategorie Wort deutlich größer als bei den Invert-Worten (siehe Tabelle 35).

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	4	2	0	0

Tabelle 35: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C3 der Gruppe 2.

Vergleichend zeigten die Ergebnisse der Komponente C3 in Gruppe 1 eine Erhöhung der gefundenen Dipole in der linken Hemisphäre, und zwar sowohl bei Wort-, als auch bei Invert-Wort-Präsentation (Kapitel 5.1.3.5).

Dipolstärke und Signalintensität waren bei den gefundenen Aktivitäten der linken Hemisphäre in etwa gleich hoch (siehe Abbildungen 50 und 51).

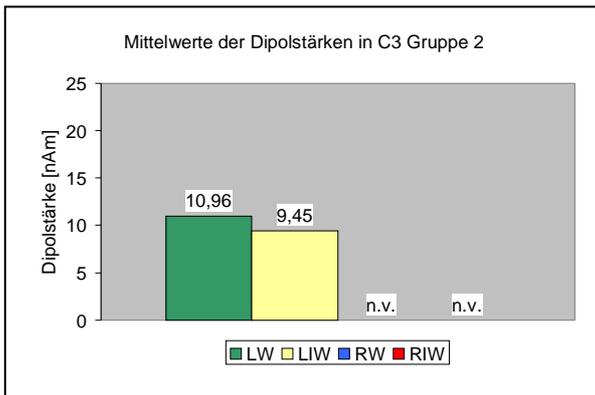


Abbildung 50: Mittelwerte der Dipolstärken in nAm der Komponente C3 Gruppe 2 in den einzelnen Untersuchungskategorien.

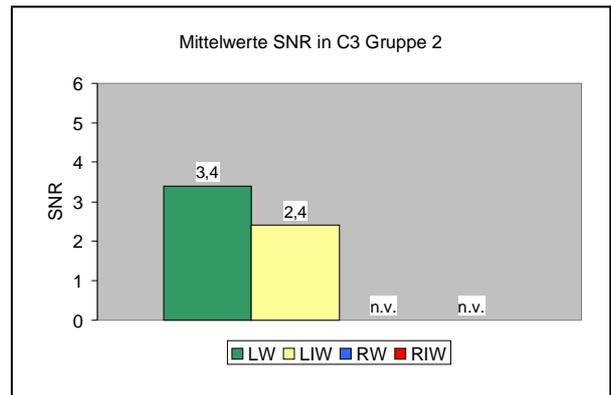


Abbildung 51: Mittelwerte der Signal-to-noise-ratio (SNR) der Komponente C3 Gruppe 2 in den einzelnen Untersuchungskategorien.

5.2.4 Komponente C4 im Zeitbereich 800 - 1200 ms

5.2.4.1 Untersuchungskategorie LW

Tabelle 36: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation (LW)

LW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	970	10,35	2,4	G.front.inf..
Mittelwert	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	
SD	nicht berechnet	nicht berechnet	nicht berechnet	

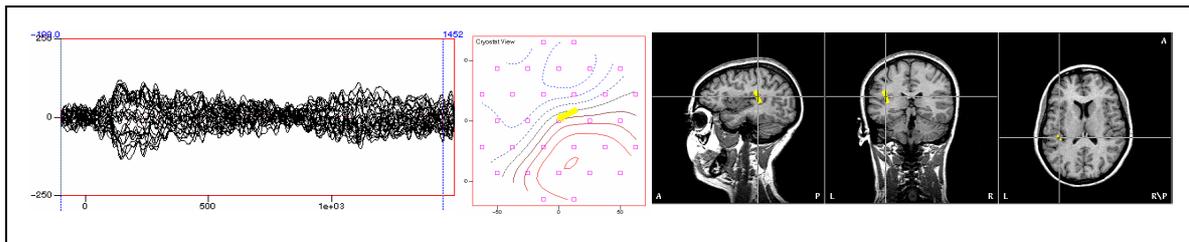


Abbildung 52: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LW) mit Dipolfeld bei 1000 ms und zugehöriger Lokalisation im MRT Bild.

Bei nur einem Probanden konnte ein auswertbares Signal gefunden werden. Dieses lag bei 970 ms mit einer Dipolstärke von 10,35 nAm und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 2,4. Wie im ersten Probandenkollektiv fanden sich die Erregungen im Gyrus frontalis inferior.

5.2.4.2 Untersuchungskategorie LIW

Tabelle 37: Probandendaten, abgeleitet über der linken Hemisphäre nach Invert-Wort-Präsentation (LIW)

LIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Es konnten keine auswertbaren Signale im Sinne der Auswahlkriterien gefunden werden.

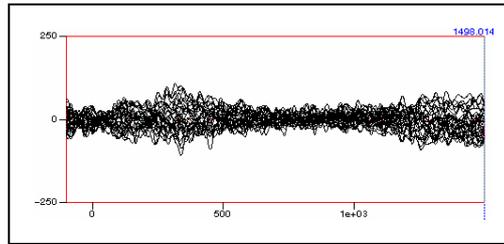


Abbildung 53: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der linken Hemisphäre (LIW).

5.2.4.3 Untersuchungskategorie RW

Tabelle 38: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RW)

	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Auch die Untersuchungskategorie RW zeigte kein auswertbares Signal.

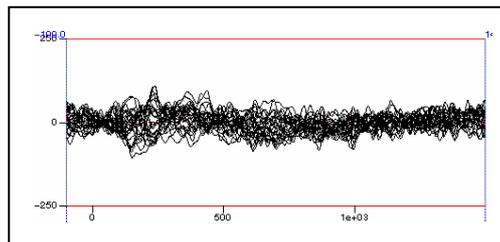


Abbildung 54: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Wortpräsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RW).

5.2.4.4 Untersuchungskategorie RIW

Tabelle 39: Probandendaten, abgeleitet über der rechten Hemisphäre nach Wort-Präsentation (RIW)

RIW	Zeitpunkt (ms)	Dipolstärke (nAm)	SNR	Lokalisation
Proband A	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband B	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband C	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband D	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Proband E	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Es konnte wiederum kein Signal im Sinne der Auswahlkriterien gefunden werden.

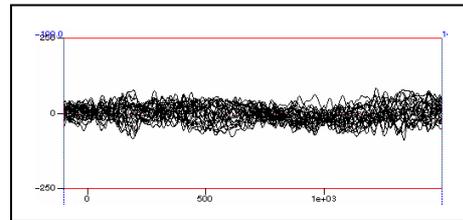


Abbildung 55: Butterflyplot Proband Gruppe 2 nach Invert-Wort-Präsentation, abgeleitet über der rechten Hemisphäre (RIW).

5.2.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse in Komponente C4

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Komponente C4 bei der Gruppe 1, die im Abschnitt 5.1.4. beschrieben wurden, fanden sich bei den Probanden mit Deutsch als Fremdsprache kaum auswertbare Signale in diesem Zeitbereich.

Lediglich ein Proband zeigte in der Kategorie LW eine Aktivierung, die mit denen der Gruppe 1 vergleichbar war (siehe Tabelle 40). Die Dipolstärke lag bei 10,35 nAm, die SNR bei 2,4. Als Ursprungsort der gefundenen Aktivierung ließ sich der Gyrus frontalis inferior ermitteln.

Untersuchungskategorie	LW	LIW	RW	RIW
Anzahl der Probanden mit Dipolaktivierung	1	0	0	0

Tabelle 40: Anzahl der Probanden mit gefundener Dipolerregung pro Untersuchungskategorie in der Komponente C2 der Gruppe 1.

Da nur eine Erregung gefunden wurde, konnten keine Mittelwerte errechnet werden.

6. Diskussion

6.1. Diskussion der Ergebnisse

6.1.1 Komponente C1 der Gruppe 1 im Zeitbereich 90 - 130 ms

Die Komponente C1 stellte die erste in dieser Studie untersuchte Aktivierung nach Stimulusbeginn dar. In der Kategorie „Deutsch als Muttersprache“ zeigten sich im Zeitbereich von 90 bis 130 ms bei fast allen Personen Dipolaktivierungen in beiden Gehirnhälften. Lediglich in der Untersuchungskategorie RIW fand sich bei einem Probanden kein Signal im angegebenen Zeitintervall. Auf Grund des zeitlichen Auftretens und der durchwegs im akustischen Kortex lokalisierten Erregung, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Komponente C1 um die N100 akustisch evozierter Potentiale handelt (Liu et al. 1998).

Das bihemisphärielle Auftreten der N100 bestätigt, dass die akustische Komponente der Wort-Stimuli sowohl im linken, als auch im rechten Kortex verarbeitet wird (Mäkelä et al. 1993). Die Darstellung der mittleren Aktivierungslatenzen in Gruppe 1 zeigte im Vergleich zur linken Seite ein früheres Signal in der rechten Hemisphäre (siehe Abbildung 12, Seite 30). Diese raschere Verarbeitung der akustischen Antwort nach kontralateraler Präsentation ist mit den in der Literatur genannten Ergebnissen vereinbar. So beschrieb z.B. Suzuki das frühere Auftreten der N100-Komponente in der rechten Hemisphäre. Dies könnte mit der vermuteten sprachlichen Dominanz der linken Hemisphäre bei Rechtshändern zusammenhängen. Es wurde beschrieben, dass die für komplexere sprachliche Aufgaben verantwortliche linke Gehirnhälfte die Effizienz der rechten Seite bei der Verarbeitung einfacher Töne erhöht (Suzuki et al. 1997). Auch Shtyrov konnte nach reiner Tonstimulation eine vermehrte Aktivierung der rechten Gehirnhälfte, im Gegensatz zur Verarbeitung von Sprachreizen in der linken Hemisphäre, nachweisen (Shtyrov et al. 2000).

Bei den Dipolstärken war kein Hemisphären-, sondern ein Stimulus-spezifischer Unterschied zu finden. Abbildung 13 (Seite 30) zeigt eine Erhöhung der Werte in den Wort-Kategorien (grün und blau) beider Hemisphären im Vergleich zu den Invert-Wort-Kategorien (gelb und rot), allerdings ohne signifikanten Unterschied.

Der Vergleich der SNR-Werte (siehe Abbildung 14, Seite 30) hingegen zeigte einen statistisch signifikante Differenz innerhalb der Untersuchungskategorien einer Hemisphäre (LW:LIW mit $p = 0,004$ und RW:RIW mit $p = 0,008$). Die Erhöhung der Dipolstärken und die gleichzeitig signifikant erhöhten Signalstärken im Vergleich zum Hintergrundrauschen (SNR) können als Korrelat einer vermehrten Aktivität nach Wortstimulation interpretiert werden. Eulitz konnte bei der Untersuchung der Verarbeitungsunterschiede von Vokalen und Tönen zeigen, dass Vokale eine höhere Dipolstärke hervorrufen als reine Tonstimulation. Dieser Sachverhalt wurde als Hinweis auf eine verstärkte, weil komplexere, sprachspezifische Verarbeitung von Vokalen interpretiert (Eulitz et al. 1995). Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch Müller, welcher die Möglichkeit aufzeigte, innerhalb der ersten 120 ms auf Grund von Klangmuster und Erinnerung zu entscheiden, ob es sich bei einem dargebotenen Reiz um ein Nomen oder einen Eigennamen handelte (Müller und Kutas 1996). In Anlehnung an Eulitz und Müller kann davon ausgegangen werden, dass die gefundene vermehrte Aktivität nach Wortpräsentation mehr als nur den rein akustischen Charakter einer N100 hat. Die gefundenen Daten sprechen eher für eine schon sehr früh beginnende Unterscheidung zwischen sprachlich korrektem und nicht korrektem Reiz, im Sinne einer sprachspezifischen Bearbeitung auf akustischer Ebene.

Betrachtet man die Lokalisationen der gefundenen Aktivierungen, so zeigt sich ein uneinheitliches Bild mit individueller Variabilität. In allen Untersuchungskategorien fand sich jedoch, neben vereinzelt Aktivierungen im Gyrus temporalis superior und Gyrus temporalis medius, der Gyrus frontalis inferior beider Hemisphären als häufigster Ursprungsort der Quellen. Dies weist auf eine Aktivierung vergleichbarer Areale in beiden Hemisphären hin.

Die gefundenen Resultate lassen auf eine Verarbeitung der frühen Sprach-Information in einer zeitlich und räumlich bihemisphäriellen Interaktion schließen.

6.1.2 Komponente C1 der Gruppe 2 im Zeitbereich 90 - 130 ms

Bei den Probanden mit Deutsch als Fremdsprache fanden sich, wie bei Gruppe 1, durchgehend Quellen im Bereich des akustischen Kortex, die als neuromagnetisches Korrelat eines frühen, akustischen Antwortpotentials interpretiert werden können (Yoshiura et al. 1995). Dieses Antwortpotential konnte, ebenfalls wie bei Gruppe 1, bihemisphäriell nachgewiesen werden. Im Gegensatz

zu L1 zeigte sich jedoch beim Vergleich der Latenzen keine schnellere Bearbeitung in der rechten Hemisphäre. Vielmehr wurde die linke Seite im Durchschnitt früher aktiviert (siehe Abbildung 37, Seite 49).

Hinsichtlich der Quellenlokalisationen zeigten sich, wie schon bei der ersten Gruppe, Aktivierungen in ähnlichen Arealen der beiden Hemisphären – nämlich in den Regionen der Gyri frontalis inferior und temporalis superior.

Der Vergleich der Dipolstärken erbrachte ebenfalls ähnliche Ergebnisse wie in Gruppe 1, da die Signale in den Wort-Kategorien beider Hemisphären deutlich erhöht waren (siehe Abbildung 13, Seite 30 und Abbildung 38, Seite 50).

Da die Resultate denen der ersten Gruppe weitgehend entsprechen, ist davon auszugehen, dass auch für Fremdsprachler die Komponente C1 nicht nur rein akustische Informationen enthält. Sinai konnte sprachspezifische Verarbeitungsvorgänge bei mehrsprachigen Probanden schon auf akustischer Ebene nachweisen (Sinai und Pratt 2002). Die stärkere Aktivierung nach Wortpräsentation kann im Sinne einer spezifischen Bearbeitung (Eulitz et al. 1996; Müller und Kutas 1996) interpretiert werden. Diese findet, wie bei den Muttersprachlern, weitgehend gleichzeitig in den homologen Arealen beider Hemisphären statt.

Folglich kann auch die Verarbeitung der frühen akustischen Komponente einer Fremdsprache als eine zeitlich parallele, bihemisphärielle Interaktion betrachtet werden.

6.1.3 Komponente C2 der Gruppe 1 im Zeitbereich 200 - 350 ms

In der Komponente C2 fanden sich bei den Muttersprachlern deutliche Unterschiede zwischen den Untersuchungskategorien Wort und Invert-Wort. Es zeigten sich etwa doppelt so viele Aktivierungen in den Wort-Kategorien als nach Invert-Wort-Präsentationen. Dies traf sowohl für die linke, als auch für die rechte Hemisphäre zu. So konnten unter Wort-Präsentation bei acht (LW), bzw. sechs (RW) Probanden Aktivierungen ermittelt werden, wo hingegen in der Untersuchungskategorie Invert-Wort nur drei (LIW), bzw. vier (RIW) Dipole gefunden wurden (siehe Tabelle 10, Seite 35). Lokalisiert wurden die Erregungen etwa gleich häufig in den Gyri temporales superiores und frontales inferiores.

Das häufigere Auftreten von Dipolaktivierungen nach Wortpräsentation kann als Zeichen eines verstärkten, kortikalen Verarbeitungsprozesses interpretiert werden.

Zouridakis fand in seiner Studie vermehrte Wortaktivität in der linken Kortexhälfte (Zouridakis et al. 1998), vorliegend jedoch konnte diese in beiden Hemisphären nachgewiesen werden. Ebenso wie unter C1 beschrieben, zeigte sich bei Wort-Präsentation in beiden Hemisphären zusätzlich zum vermehrten Auftreten der Signale auch eine Erhöhung der Dipolstärken. Allerdings waren die Unterschiede weder bei den Dipolstärken, noch bei den Signal-Rausch-Verhältnissen statistisch signifikant (siehe Abbildungen 19 und 20, Seite 35). Sprachspezifische Verarbeitungsvorgänge im beschriebenen Zeitbereich wurden durch Marslen nachgewiesen. Demnach ist es möglich, ein Wort bereits 250 ms nach Beginn der akustischen Präsentation nachzusprechen, da schon das Hören weniger Laute die potentiell möglichen Worte soweit eingrenzt, dass eine rasche Zuordnung auf Grund von Erfahrungswerten erfolgen kann (Marslen 1987). Bei Untersuchungen mit Kindern konnte ebenfalls eine Worterkennung nach ca. 300 ms nachgewiesen werden (Fernald et al. 2001).

In beiden Hemisphären wurden wiederum vor allem die frontalen Anteile des Kortex aktiviert. Wenn auch die individuellen Lokalisationen, wie schon in der Komponente C1, große Unterschiede zeigten, so ließ sich doch eine vorwiegende Aktivierung der Gyri frontales inferiores feststellen. Friederici et al. beobachteten im Zeitbereich um etwa 200 ms eine Aktivierung im vorderen Anteil des linken Gyrus frontalis. Diese „early left anterior negativity“ (ELAN) wurde bei syntaktisch falschen Sprachpräsentationen beobachtet (Friederici et al. 1993, 1995). Die Quellenlokalisationen in der Frontalregion, d.h. genau in dem für die ELAN als spezifisch beschriebenen Bereich, bestätigt die Annahme einer sprachspezifischen Komponente im Zeitbereich von 200 bis 350 ms. In einer späteren Studie zeigte Friederici erneut in den inferioren fronto-temporalen Abschnitten der linken und rechten Hemisphäre lokalisierte, sprachassoziierte Aktivität (Friederici und Alter 2004). Dementsprechend fanden sich auch bei der vorliegenden Untersuchung Erregungen in beiden Hemisphären.

Die Ergebnisse der Komponenten C1 und C2 sind sehr ähnlich. Beide zeigen starke Aktivität nach Wortpräsentation in jeweils ähnlichen Arealen beider Hemisphären. In Anlehnung an das Hebb'sche Modell kann ein beide Hemisphären übergreifendes Netzwerk kortikaler Fasern angenommen werden (Hebb 1949). Dieses Netz verbindet funktionell verschaltete, auch weit entfernte Areale miteinander und führt so zu einer parallelen Interaktion der Hemisphären

bei der Verarbeitung von Muttersprache (Pulvermüller und Mohr 1996). Die Bedeutung räumlich entfernter gelegener, sprachassoziierter Strukturen der rechten Hemisphäre konnte durch Studien an Patienten mit Hirnläsionen belegt werden. Es zeigte sich, dass eine kortikale Reorganisation der Sprache unter vermehrter Aktivierung der rechten Hemisphäre wenigstens zum Teil möglich ist (Weiller 1998; Musso et al. 1999; Saur et al. 2004).

Die kortikale Wortverarbeitung beginnt folglich schon auf einer frühen Ebene der akustischen Verarbeitung bei zirka 100 ms und setzt sich bis in den Bereich der Komponente C2 (um zirka 250 ms) fort. Dies geschieht vermutlich im Sinne eines kortikalen Netzwerkes, welches eine bihemisphärielle und zeitlich parallele Interaktion möglich macht.

6.1.4 Komponente C2 der Gruppe 2 im Zeitbereich 200 - 350 ms

Die Komponente C2 in der Gruppe der Fremdsprachler zeigte ausschließlich in der linken Hemisphäre Aktivität (vergleiche Tabelle 30, Seite 53). Beim Vergleich der gefundenen Dipolstärken und SNR-Werte fand sich, ebenfalls wie in der Gruppe der Muttersprachler, eine deutliche Erhöhung der mittleren Dipolstärken nach Wortpräsentation (siehe Abbildung 44 und 45, Seite 53).

Chernigovskaya hob schon 1983 die wichtige Rolle der linken Gehirnhälfte bei der Verarbeitung einer zweiten Sprache hervor. Hier konnte gezeigt werden, dass die Fremdsprache zum großen Teil linkshemisphärisch, die Muttersprache hingegen in beiden Gehirnhälften bearbeitet wird (Chernigovskaya et al. 1983). Klein beschrieb ebenfalls eine deutliche Aktivierung der linken Seite, und zwar sowohl bei L1, als auch bei L2 in ähnlichen Gebieten. Daneben war zusätzlich der Stammganglienbereich der linken Hemisphäre, insbesondere das Putamen, involviert (Klein et al. 1994). Diese Sichtweise wurde in der Literatur ausgiebig diskutiert. So fanden andere Studien eher Hinweise auf eine verstärkte Verarbeitung in der rechten Hemisphäre (Petsche et al. 1993) oder Aktivierungen anderer Areale bei L2, jedoch im Sinne eines fronto-temporalen Netzwerkes beider Hemisphären (Dehaene et al. 1997).

Eine wichtige Rolle bei der Verteilung der am Verarbeitungsprozess beteiligten Gebiete spielt wahrscheinlich das Alter, in welchem die zweite Sprache erlernt wird (Flege et al. 1995). Man vermutete, dass bei einer in der Kindheit erlernten Fremdsprache die rechte Hemisphäre stärker involviert ist als bei spät erworbener

Zweisprachigkeit (Silverberg et al. 1979). Friederici konnte einen prinzipiell unterschiedlichen Verarbeitungsprozess von L1 und L2 bei Lernenden höheren Alters zeigen (Friederici et al. 2002). Krashen, und später Johnson, beschrieben eine zunehmende Übereinstimmung der kortikalen Sprachsysteme, je jünger die Lernenden waren (Krashen et al. 1982; Johnson und Newport 1989). Bei Erlernen der Fremdsprache nach dem siebten Lebensjahr scheinen für lexikale Aspekte eher die gleichen, für grammatikalische eher unterschiedliche kortikale Gebiete zuständig zu sein (Fabbro 2001). Kim wies für Spätlernende eigene Fremdsprachenareale frontal nach (Broca-Areal), wohingegen beim frühen Erlernen im Broca-Areal vergleichbare Gebiete für beide Sprachen genutzt wurden. Im Wernicke-Areal wurden für L1 und L2 unabhängig vom Alter des Erlernens die gleichen Strukturen aktiviert (Kim et al. 1997).

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Probanden haben allesamt erst nach dem 20. Lebensjahr Deutsch gelernt und gehören damit eindeutig in die Gruppe der Spätlernenden. Die im Vergleich mit den Muttersprachlern fehlende Aktivierung der rechten Hemisphäre kann daher als eine unterschiedliche kortikale Repräsentation von L1 und L2 nach spätem Erlernen gesehen werden.

Neben dem Alter hat auch das Beherrschen der Fremdsprache Auswirkung auf die Lokalisation aktivierter Gebiete. Geringes Können bedingt ein anderes kortikales Netzwerk (Perani et al. 1998) und eine geringere Zahl an gemeinsam aktivierten Arealen bei L1 und L2 (Dehaene et al. 1997). Der Grad des Könnens scheint dabei für die kortikale Repräsentation entscheidender zu sein als das Alter des Erlernens (Perani et al. 1998). So konnten bei Probanden mit hohem Sprachvermögen keine Unterschiede zwischen L1 und L2 gefunden werden (Chee et al. 1999). Die vorliegend untersuchten Probanden hatten zwar gute Deutschkenntnisse zum Untersuchungszeitpunkt, waren jedoch nicht als perfekt zweisprachig zu betrachten.

Das Fehlen einer rechtshemisphärischen Aktivierung, und davon ausgehend die Annahme eines kleineren und anders strukturierten, kortikalen Netzwerkes, sind beim hier vorhandenen späten Erlernen und geringeren Können der Fremdsprache durchaus mit den Erkenntnissen aus der oben genannten Literatur vereinbar.

6.1.5 Komponente C3 der Gruppe 1 im Zeitbereich 400 - 500 ms

In dieser Komponente zeigte sich bei fast allen Probanden eine Aktivierung in der linken Hemisphäre, sowohl nach Wort-, als auch nach Invert-Wort-Präsentation. Bei etwa der Hälfte der Versuchsteilnehmer konnte auch in der rechten Gehirnhälfte eine Aktivierung festgestellt werden (siehe Tabelle 15, Seite 40). Die linksseitig gemessenen Dipolstärken waren für Wort- und Invert-Wort-Präsentation im Durchschnitt vergleichbar. Die mittleren Dipolstärken der rechten Hemisphäre waren zwar niedriger als in der linken Hemisphäre, aber ein statistisch signifikanter Unterschied bestand nicht (vergleiche Abbildung 25, Seite 40). Auch der Vergleich der SNR war nicht signifikant (siehe Abbildung 26, Seite 40).

Eine sprachassoziierte Komponente um 400 ms wurde schon 1980 von Kutas und Hillyard beschrieben. Diese Ereignis-korrelierte Negativierung mit zentro-parietalem Maximum wurde durch semantisch fehlerhafte Sätze hervorgerufen (Kutas und Hillyard 1983). Andere Arbeiten fanden die so genannte N400 bei inhaltlichem Vergleich von Wortpaaren wie beispielsweise Baum und Birke (Bentin et al 1993). Diese Studien bestätigten die semantische Bedeutung der Komponente um 400 ms bei der Verarbeitung von Sprachreizen. Allerdings ist die N400 keine spezifisch akustische Komponente; sie fand sich beispielsweise auch bei visuellen Sprachparadigmen (Rossell et al. 2003).

Die vorliegenden Ergebnisse zeigten nach Wort-, ebenso wie nach Invert-Wort-Präsentation, eine vermehrte linksseitige Erregung. Diese linkshemisphärische Dominanz der N400 wurde schon von Friederici und Mitarbeitern beobachtet. Eine elektrische Antwort 400 ms nach Stimulusbeginn wurde dort durch semantische, aber auch durch syntaktische Fehler hervorgerufen und in den anterior-frontalen Arealen des linksseitigen Kortex lokalisiert (Friederici 1993, 1995). Daneben zeigten neuere Studien auch rechtshemisphärische semantische Verarbeitungsprozesse (Friederici et al. 2002, 2004). Jedoch konnte eine deutliche Lateralisation in die linke Hemisphäre gezeigt werden (Luke et al. 2002).

Eine Unterteilung der Komponente C3 in syntaktische und semantische Anteile war bei der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Die gefundene Aktivität stellte sich vielmehr als eine einzelne Komponente mit Lateralisation in die linke Hemisphäre dar und unterstreicht die in der Literatur beschriebene linkshemisphärische Dominanz.

Unterschiede zu früheren Arbeiten zeigten sich bei den beobachteten mittleren Dipolstärken. Friederici beschrieb eine positive Korrelation zwischen semantischem Fehler und resultierender Signalstärke (Friederici et al. 1993). Auch Holcomb, und später Eulitz, konnten nach akustischer Präsentation eines semantischen Fehlers eine höhere Aktivität in der linken Hemisphäre nachweisen (Holcomb und Neville 1990; Eulitz et al. 1996). Im Gegensatz dazu waren die in dieser Arbeit dargestellten mittleren Dipolstärken für Worte und Invert-Worte vergleichbar hoch, was vermutlich durch den Versuchsaufbau zu erklären ist. Die Präsentation eines einzelnen Wortes, ohne den Kontext eines zusammenhängenden Satzes, erfährt eine andere inhaltliche Beurteilung als ein vollständiger Satz. Daher ist auch der semantische Fehler nicht so groß und das zu erwartende Signal nicht so ausgeprägt. Da eine semantische Verarbeitung jedoch auch nach Einzelwort-Präsentation beschrieben wurde (Holcomb und Neville. 1990; Abdullaev und Posner 1998), kann die gefundene Komponente C3 im Sinne einer semantischen Verarbeitung interpretiert werden, welche nach links lateralisiert im Bereich des Gyrus frontalis inferior stattfindet.

6.1.6 Komponente C3 der Gruppe 2 im Zeitbereich 400 - 500 ms

Bei den Fremdsprachlern zeigten sich die Aktivierungen wie schon in der Komponente C2 nur in der linken Hemisphäre. Die gefundenen Areale, meist der Gyrus frontalis inferior, entsprachen dabei weitgehend denen der Gruppe 1. Dabei war die Anzahl gefundener Dipole nach Wort-Präsentation höher als nach Invert-Worten (siehe Tabelle 35, Seite 57). Auch die Dipolstärken und die SNR waren bei Wort-Präsentation im Vergleich zu Invert-Worten erhöht, wenn auch nicht statistisch signifikant (vergleiche Abbildungen 50 und 51, Seite 57).

Eine semantische Bedeutung des Zeitbereichs um 400 ms ist auch für die Fremdsprachenverarbeitung bekannt. So konnte schon 1980 eine Aktivierung der linken Hemisphäre bei etwa 400 ms nach Sprachpräsentation nachgewiesen werden (Caramazza und Brones 1980). Bezüglich der an der Verarbeitung beteiligten kortikalen Areale findet sich in der Literatur jedoch keine einstimmige Auffassung. Paradis beobachtete für semantische Aufgaben deutliche Unterschiede in der Verteilung involvierter Hirnregionen bei Mutter- und Fremdsprache (Paradis et al. 1979). Auch aktuellere Arbeiten demonstrierten das Vorliegen unterschiedlicher kortikaler Netzwerke für L1 und L2, wobei die rechte

Hemisphäre zumindest teilweise an der Fremdsprachenverarbeitung beteiligt war (Pillai et al. 2003), eine linkshemisphärische Lateralisation jedoch deutlich wurde (Proverbio et al. 2002). Illes beschrieb Aktivierungen in den Frontalregionen beider Hemisphären, entsprechend denen bei der Verarbeitung von Muttersprache (Illes et al. 1999). Auch Francis fand bei semantischer Verarbeitung gleiche Hirnareale bei L1 und L2 beteiligt und ging daher von einem gemeinsamen semantischen Netzwerk aus (Francis 1999). Gerade bei mäßigem Beherrschen einer Fremdsprache schien ein gemeinsames neuronales Netzwerk für L1 und L2 vorzuliegen (Xue et al. 2004).

Diese Auffassung kann durch die Untersuchungen dieser Arbeit zumindest für die linke Hemisphäre bestätigt werden. Die aufgezeichneten Erregungen der Probanden mit nicht perfekten Sprachkenntnissen fanden sich ausschließlich linkshemisphärisch, und nicht wie in der Literatur und auch in der Gruppe 1 beschrieben im Sinne einer Lateralisierung. Jedoch unter Beteiligung der Gyri frontales inferiores, welche bei beiden Probandengruppen gefunden wurde.

Die semantische Komponente der Wortverarbeitung im Zeitbereich 400 bis 500 ms wurde auch in der Gruppe 2 ausschliesslich linkshemisphärisch, wiederum unter Beteiligung vergleichbarer Areale wie in der Gruppe 1, nachgewiesen. Ein gemeinsames semantisches Netzwerk für Mutter- und Fremdsprache ist daher anzunehmen.

6.1.7 Komponente C4 der Gruppe 1 im Zeitbereich 800 - 1000 ms

Im Zeitintervall zwischen 800 und 1000 ms fanden sich Aktivierungen bei acht von zehn Muttersprachlern (siehe Tabelle 20, Seite 45). Dabei zeigten sich in beiden Hemisphären und Untersuchungskategorien etwa gleich häufig Signale mit vergleichbar hoher mittlerer Dipolstärke (siehe Abbildung 31, Seite 45). Die SNR-Werte wiesen keine statistisch signifikanten Unterschiede auf (siehe Abbildung 32, Seite 45). In beiden Hemisphären wurde jeweils der Gyrus frontalis inferior als häufigster Ursprungsort lokalisiert.

Das späte Zeitintervall ab 800 ms nach Stimulusbeginn wurde bisher wenig untersucht. Wie in der Diskussion der zeitlich früheren Komponenten dargelegt, spricht vieles dafür, dass sich das Erkennen und Zuordnen von Sprachreizen in einem frühen Zeitbereich der akustischen Verarbeitung vollzieht. Nach einer

semantischen Komponente bei etwa 400 ms ist der größte Teil der Verarbeitung damit wahrscheinlich am Stimulusende nach etwa 600 ms abgeschlossen.

Hier jedoch konnte bei den meisten Probanden, wie oben geschildert, eine vierte, sehr späte und deutlich nach Beendigung des akustischen Reizes auftretende, Komponente gefunden werden. Wie bereits an früherer Stelle beschrieben, kann die Häufigkeit einer Dipolerregung pro Zeitintervall als Maß der Aktivierung betrachtet werden (Zouridakis et al. 1998). Das Vorliegen von Aktivierungspotentialen in diesem späten Zeitintervall bei fast allen Probanden lässt daher eine sprachbezogene Verarbeitung vermuten.

Eulitz und Mitarbeiter beobachteten in einer MEG-Studie mit einer mittleren Stimuluslänge von 600 ms das Auftreten einer Komponente bei 800 ms, die als „Reentry-“ oder „Nachklangeffekt“ der präsentierten Stimuli interpretiert wurde. Sie vermuteten darin die Funktion eines abschließenden Kontroll- oder Reparatur-Mechanismus bei nicht korrekten Sprachstimuli (Eulitz et al. 1994, 1996). Auch Papanicolaou konnte eine späte, vor allem linkshemisphärisch lateralisierte, sprachassoziierte Komponente im Sinne eines Memory-Effektes nachweisen (Papanicolaou et al. 2003). Ein „Reparaturvorgang“, bzw. eine „Abschluss-Kontrolle“ sollte jedoch erwartungsgemäß bei falschen Sprachreizen zu einer verstärkten Aktivierung führen. D.h. nach Invert-Wort-Präsentation wäre eine Signalerhöhung zu erwarten gewesen. Stattdessen zeigten in der vorliegenden Untersuchung die Dipolstärken der linkshemisphärischen Wortkategorie (LW) eine leichte Erhöhung. Da die Kontrolle eines korrekten Reizes aber nicht sinnvoll ist, erscheint eine Reentry-Funktion der späten Komponente als unwahrscheinlich.

Osterhout und Mitarbeiter haben die Theorie eines „working memory“ als späte syntaktische Bearbeitung eines Sprachreizes aufgestellt (Osterhout et al. 1994), welche schon in früheren Arbeiten im Zeitbereich um 600 ms nach Stimulusbeginn vermutet wurde (Kluender und Kutas 1993). Eine syntaktische Verarbeitung von Worten, ohne den Kontext eines Satzes, ist jedoch nicht unbedingt zu erwarten. Dementsprechend sollte die späte Komponente keine syntaktische Bedeutung haben. Stattdessen ist der nicht unmittelbar mit der Sprache verbundene Prozess einer Assoziationsbildung in Erwägung zu ziehen. Jeder Sinnesreiz kann erinnerungsspezifische Assoziationen auslösen (beispielsweise Gefühle von Furcht oder Freude durch das Wort „Hund“). Eine Assoziation kann durch individuelle Erinnerungen kortikal sehr unterschiedlich repräsentiert sein, was die

große, individuelle zeitliche Streubreite der gefundenen Erregungen erklären könnte. Worte sollten in der Regel, wenn es sich um alltäglich gebräuchliche Nomen handelt, eine Assoziation auslösen. Ausdruck davon könnten die tendenziell erhöhten SNR-Werte der Wortkategorien sein. Da sich bei den Invert-Worten vergleichbare Werte finden (keine signifikanten Unterschiede), kann auch hier der Versuch einer Assoziations-Zuordnung angenommen werden.

Da in beiden Hemisphären erneut die gleichen Areale aktiviert wurden, kann von einer bihemisphäriell parallel ablaufenden, assoziativen Bearbeitung der Stimuli im frontalen Kortex ausgegangen werden.

6.1.8 Komponente C4 der Gruppe 2 im Zeitbereich 800 - 1000 ms

Im Gegensatz zur ersten Gruppe fand sich für dieses Zeitintervall bei den fremdsprachigen Probanden lediglich eine einzige Aktivierung in der linken Hemisphäre nach Wort-Präsentation. Die rechte Seite blieb erneut ohne nachweisbare Aktivität (siehe Tabelle 40, Seite 60). Das Auftreten einer späten Komponente als Verarbeitung im Sinne eines „Reentry“- oder Reparatur-Mechanismus, wie es in der Gruppe 1 diskutiert wurde, hätte gerade bei den weniger geübten Fremdsprachlern einleuchten können. Das fast vollständige Fehlen der Komponente macht den Erklärungsversuch einer Kontrollfunktion jedoch unwahrscheinlich. Stattdessen wird die Theorie der Assoziation unterstützt. Es ist anzunehmen, dass Worte in einer Fremdsprache weniger Assoziationen auslösen als in der Muttersprache. Bei der Fremdsprache geht es, zumindest bei nicht perfekten Anwendern, zunächst um die Vermittlung von Informationen. Zusätzliche Komponenten wie Gefühle stehen im Hintergrund und die „emotionale Beladung“ eines Wortes ist auf Grund der verkürzten Anwendungsdauer bei Probanden mit lediglich befriedigenden Sprachkenntnissen möglicherweise nicht so ausgeprägt. Der assoziative Aspekt bei invertierten Worten war schon in der ersten Gruppe geringer ausgeprägt als bei Wort-Präsentation. In der Gruppe der Fremdsprachler war ein solcher gar nicht zu erwarten, da die potentielle Erinnerung an Wortneuschöpfungen nicht vorausgesetzt werden konnte. Entsprechend zeigte sich auch ein vollständiges Fehlen von Aktivierung nach Invert-Wort-Präsentation. Im Gegensatz zur Muttersprache besteht bei der Fremdsprache also keine Notwendigkeit zur assoziativen Verknüpfung, womit das weitgehende Fehlen der Komponente C4 in Gruppe 2 erklärbar wird.

6.2 Diskussion der Methode

Für diese Arbeit wurde die Methode der Magnetenzephalographie (MEG) ausgewählt. Durch das hohe zeitliche Auflösungsvermögen und die gleichzeitige Möglichkeit der räumlichen Quellenlokalisierung in der MRT, können komplexe Verschaltungsvorgänge bei der Verarbeitung von Sprachreizen betrachtet und die einzelnen Verarbeitungsschritte getrennt analysiert werden (Papanicolaou 1995). Ihren Stellenwert in der wissenschaftlichen Forschung verdankt die MEG-Technik unter anderem dem gegenüber anderen Methoden großen Vorteil der Nichtinvasivität. Ältere Vorgehensweisen, wie z.B. die intracarotidale Injektion von Amobarbital (Wada-Test) zur Feststellung der sprachlichen Dominanz der Hemisphären (Wada et al. 1960), werden noch vereinzelt angewandt, waren jedoch zur Beantwortung der vorliegenden Fragestellungen nicht geeignet. Auch der Einsatz wenig invasiver Techniken, wie die der Doppler-Sonographie, bietet sich nur für spezielle Untersuchungen an (Rihs et al. 1999). Im Zusammenhang mit Sprachstudien kam die Positronenemissionstomographie (PET) häufig zum Einsatz (Herholz et al. 1996) und erzielte, wie in der Einleitung beschrieben, wichtige Ergebnisse. Die Notwendigkeit der Injektion von Radionukliden ist aber, bei gleichzeitig nur wenig genauer Möglichkeit der räumlichen Darstellung, ein deutlicher Nachteil dieser Methode. Eine vergleichbare zeitliche Auflösung wie die MEG bietet die Elektroenzephalographie (EEG). Außerdem können damit räumlich sehr weit auseinander liegende Sprachareale gleichzeitig untersucht werden (Weiss und Rappelsberger 1996). Die EEG-Messungen sind jedoch in höherem Maße von den unterschiedlichen elektrischen Leitungsfähigkeiten von Kortex, Liquor und Schädelkalotte abhängig, als es bei der MEG der Fall ist (Hauelsen et al. 1997). Sprachassoziierte Erregungen werden tiefer im Kortex gelegen generiert und sind daher mit der MEG-Technik besser zu erfassen. Zusätzlich liegt bei der EEG eine referenzabhängige Messung der Potentiale vor, die zu Verzerrungen bei der Ableitung führen kann, weil die erhobenen Daten immer in Bezug auf eine „Kontrollelektrode“ gemessen werden (Nuwer 1994). Dies ist bei der MEG nicht der Fall, so dass eine direkte Korrelation zwischen Messwerten und Ursprungsquelle möglich ist. Zusammenfassend ist die MEG zur Ableitung der in tiefer gelegenen Arealen tangential orientierten Dipole, wie sie bei Sprachstudien entstehen, besser geeignet als die EEG (Rose und Ducla-Soares 1990).

Eine Schwierigkeit bei der Anwendung der MEG zur Lokalisierung von Quellen ist die erforderliche Signalintensität bezogen auf das Hintergrundrauschen (Signal to Noise Ratio). Um eine verlässliche Lokalisierung erreichen zu können, ist eine SNR von größer acht bis zehn erforderlich. Die vorliegenden Intensitäten lagen jedoch nur bei etwa drei bis vier. Dies schränkt die Präzision der Quellenlokalisierung und der Schätzung der Dipolstärke ein, da die Genauigkeit der räumlichen Auflösung der MEG mit der Höhe des SNR korreliert (Pesola et al. 1999). Zusätzlich erschwert wird eine genaue Lokalisierung durch die individuellen morphologisch-kortikalen Gegebenheiten der Probanden. Beispielsweise kann es wegen eines individuell längeren Planum temporale oder einer anders konfigurierten Sylvischen Fissur in der linken Hemisphäre zu interhemisphäriellen Unterschieden kommen (Musiek 1986). Ein exakter Lokalisationsvergleich mit anderen Probanden kann wegen dieser individuellen Asymmetrie erschwert werden (Eulitz et al. 1995).

6.3 Diskussion des Versuchsaufbaus

Die Präsentation von Worten stellt einen einfachen Versuchsaufbau dar. Andere Sprachstudien arbeiteten mit komplexen Sätzen, in welche syntaktische oder semantische Fehler eingebaut waren. Solch komplexe Paradigmen können kortikale Signale hervorrufen, die Schwierigkeiten bei der Interpretation machen. Eulitz konnte beispielsweise nachweisen, dass durch Mehrsilbigkeit ein komplexer Verarbeitungsprozess entsteht (Eulitz et al. 1996). Daher wurde bei der vorliegenden Arbeit bewusst ein einfaches Paradigma ausgewählt und einsilbige Worte präsentiert. Zur Abgrenzung von diesem korrekten Sprachreiz wurde ein Teil der Worte invertiert. Dies sollte zunächst die Konzentration der Probanden erhöhen, aber auch durch den Aspekt des Neuen weniger Assoziationen auslösen. Alternativ hätten „Pseudoworte“ – Worte, bei denen z.B. der Anfangsbuchstaben verändert ist, und die damit keinen Sinn ergeben (Nund statt Hund) – verwendet werden können. Der Anteil der dabei zu erwartenden Assoziationen wären jedoch vermutlich größer gewesen und hätte eine exakte Interpretation erschwert.

Die akustische Präsentation erfolgte, wie an früherer Stelle beschrieben, monoaural, mit anschließender kontralateraler Ableitung in zwei aufeinander folgenden Messungen. Eine biaurale Stimulus-Präsentation, welche dem

natürlichen Hörvorgang entspricht, war auf Grund des zum Zeitpunkt vorhandenen Schlauch-Trichter-Systems nicht möglich. Idealerweise hätte die Signalaufzeichnung mit einem Ganzkopf-Meßsystem (Ackermann et al. 1999) erfolgen sollen, welches einen direkten, simultanen Hemisphärenvergleich ermöglicht und so die Hemisphäreninteraktion noch besser dargestellt hätte. Alternativ wurde das Abkippen der beiden Kryostaten in die waagerechte Position zum gleichzeitigen Ableiten der Signale über beiden Schläfenlappen versucht. Dies war jedoch aufgrund des Kühlsystems mit flüssigem Helium nicht möglich.

7. Zusammenfassung

Bislang wurde die Wortverarbeitung der Muttersprache in verschiedenen Zeitabschnitten vor allem in der sprachdominanten linken Hemisphäre beschrieben. Bezüglich des zeitlichen Ablaufes und der kortikalen Repräsentation der Fremdsprachenverarbeitung lagen nur wenige Daten mit kontroversen Ergebnissen vor. In dieser Arbeit sollte die zeitliche und räumliche Auflösung der Magnetenzephalographie (MEG) genutzt werden, um zeitliche und strukturell-anatomische Unterschiede in der Verarbeitung von Mutter- und Fremdsprache darzustellen. Das rechtshändige Probandenkollektiv setzte sich aus je einer Gruppe von zehn deutschen Muttersprachlern und fünf Probanden mit Fremdsprache Deutsch zusammen. Einsilbige Worte und invertierte Worte wurden monoaural präsentiert, die entstehenden Potentiale kontralateral mittels MEG abgeleitet und verglichen. Die sprachspezifische Verarbeitung von Worten der Mutter- und Fremdsprache beginnt mit einer frühen akustischen Komponente bei 100 ms, im Sinne eines bihemisphäriellen, zeitlich und räumlich parallel ablaufenden Prozesses. Sie setzt sich bei der Muttersprache gleichermaßen bihemisphäriell bis zirka 250 ms fort. In diesem Zeitabschnitt erfolgt bei der Fremdsprachenverarbeitung bereits eine Lateralisierung zur sprachdominanten linken Hemisphäre, welche bis zum Abschluss des Verarbeitungsprozesses um 400 ms beibehalten wird. Eine solche Lateralisierung zur linken Hemisphäre findet bei der Muttersprache erst auf semantischer Ebene bei 400 ms statt. Anschließend erfolgt um 1000 ms erneut eine zeitlich parallele, bihemisphärielle Interaktion, im Sinne einer Assoziationsbildung.

Die Verarbeitung von Worten in Mutter- und Fremdsprache erfolgt demnach in einem vergleichbaren zeitlichen Ablauf in den kortikalen Arealen der linken Hemisphäre. Die Fremdsprachenverarbeitung ist jedoch um die späte Assoziationskomponente verkürzt. Das räumlich-kortikale Netzwerk der Muttersprache ist deutlich weiter verzweigt als bei der Fremdsprache und beteiligt die rechte Hemisphäre im Sinne einer bihemisphäriell parallelen Interaktion. Linkshemisphärisch sind die involvierten anatomischen Areale für Mutter- und Fremdsprache weitgehend identisch, so dass von einem gemeinsamen, linkshemisphärischen kortikalen Netzwerk ausgegangen werden kann.

8. Literaturliste

Abdullaev YG, Posner MI. Event-related brain potential imaging of semantic encoding during processing single words. *Neuroimage*. 1998 Jan;7(1):1-13.

Ackermann H, Lutzenberger W, Hertrich I. Hemispheric lateralization of the neural encoding of temporal speech features: a whole-head magnetencephalography study. *Brain Res Cogn Brain Res*. 1999 Mar;7(4):511-8.

Balish M, Muratore R. The inverse problem in electroencephalography and magnetencephalography. *Adv Neurol*. 1990;54:79-88.

Bentin S, Kutas M, Hillyard SA. Electrophysiological evidence for task effects on semantic priming in auditory word processing. *Psychophysiology*. 1993 Mar;30(2):161-9.

Binder JR, Swanson SJ., Hammeke TA, Morris MD. Determination of language dominance using functional MRI. *Neurology*. (1996) 46;978-984

Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Cox RW, Rao SM, Prieto T. Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*. 1997 Jan 1;17(1):353-62.

Breier JI, Simos PG, Zouridakis G, Papanicolaou AC. Lateralization of cerebral activation in auditory verbal and non-verbal memory tasks using magnetencephalography. *Brain Topogr*. 1999 Winter;12(2):89-97.

Broca P, 1861. Remarques sur le siège de la faculté de langage articulée, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bull Soc Anat* 1861; 36:330-57.

Calabrese P, Neufeld H, Falk A, Markowitsch HJ, Muller C, Heuser L, Gehlen W, Durwen HF. Word generation in bilinguals - fMRI study with implications for language and memory processes. *Fortschr Neurol Psychiatr*. 2001 Jan;69(1):42-9.

Cappa SF. Probandcortical aphasia: still a useful concept? *Brain Lang.* 1997 Jul;58(3):424-6; discussion 436-58.

Caramazza A, Brones I. Semantic classifications in bilinguals. *Canadian Journal of Psychology* 1980, 34, 77-81.

Chee MW, Tan EW, Thiel T. Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci.* 1999 Apr 15;19(8):3050-6.

Chee MW, Hon N, Lee HL, Soon CS. Relative language proficiency modulates BOLD signal change when bilinguals perform semantic judgments. Blood oxygen level dependent. *Neuroimage.* 2001 Jun;13(6 Pt 1):1155-63.

Chernigovskaya TV, Balonov LJ, Deglin VL. Bilingualism and brain functional asymmetry. *Brain Lang.* 1983 Nov;20(2):195-216.

Coney J, Evans KD. Hemispheric asymmetries in the resolution of lexical ambiguity. *Neuropsychologia.* 2000;38(3):272-82.

Connolly JF, Stewart SH, Phillips NA. The effects of processing requirements on neurophysiological responses to spoken sentences. *Brain Lang.* 1990 Aug;39(2):302-18.

Dehaene S, Dupoux E, Mehler J, Cohen L, Paulesu E, Perani D, van de Moortele PF, Lehericy S, Le Bihan D. Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *Neuroreport.* 1997 Dec 1;8(17):3809-15.

Diesch E, Luce T. Magnetic fields elicited by tones and vowel formants reveal tonotopy and nonlinear summation of cortical activation. *Psychophysiol.* 1997 Sep;34(5):501-10.

Eulitz C, Elbert T, Bartenstein P, Weiller C, Muller SP, Pantev C. Comparison of magnetic and metabolic brain activity during a verb generation task. *Neuroreport*. 1994 Dec 30;6(1):97-100.

Eulitz C, Diesch E, Pantev C, Hampson S, Elbert T. Magnetic and electric brain activity evoked by the processing of tone and vowel stimuli. *J Neurosci*. 1995 Apr;15(4):2748-55.

Eulitz C, Maess B, Pantev C, Friederici AD, Feige B, Elbert T. Oscillatory neuromagnetic activity induced by language and non-language stimuli. *Brain Res Cogn Brain Res*. 1996 Sep;4(2):121-32.

Fabbro F. The bilingual brain: cerebral representation of languages. *Brain Lang*. 2001 Nov;79(2):211-22.

Fernald A, Swingle D, Pinto JP. When half a word is enough: infants can recognize spoken words using partial phonetic information. *Child Dev*. 2001 Jul-Aug;72(4):1003-15.

Fiebach CJ, Friederici AD, Muller K, von Cramon DY, Hernandez AE. Distinct brain representations for early and late learned words. *Neuroimage*. 2003 Aug;19(4):1627-37.

Flege JE, Munro MJ, MacKay IRA. Effects of age of second language learning on the production of English consonants. *Speech communication*; 1995 16: 1-26.

Francis WS. Cognitive integration of language and memory in bilinguals: semantic representation. *Psychol Bull*. 1999 Mar;125(2):193-222.

Friederici AD, Pfeifer E, Hahne A. Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Brain Res Cogn Brain Res*. 1993 Oct;1(3):183-92.

Friederici AD. The time course of syntactic activation during language processing: a model based on neuropsychological and neurophysiological data. *Brain Lang.* 1995 Sep;50(3):259-81.

Friederici AD, Meyer M, von Cramon DY. Auditory language comprehension: an event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain Lang.* 2000 Dec;75(3):289-300.

Friederici AD, Steinhauer K, Pfeifer E. Brain signatures of artificial language processing: evidence challenging the critical period hypothesis. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2002 Jan 8;99(1):529-34. Epub 2002 Jan 02.

Friederici AD, Alter K. Lateralization of auditory language functions: A dynamic dual pathway model. *Brain Lang.* 2004 May;89(2):267-76.

Frith CD, Friston KJ, Liddle PF, Frackowiak RS. A PET study of word finding. *Neuropsychologia.* 1991;29(12):1137-48.

Gott PS. Language after dominant hemispherectomy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1973 Dec;36(6):1082-8.

Hagoort P, Brown CM. ERP effects of listening to speech compared to reading: the P600/SPS to syntactic violations in spoken sentences and rapid serial visual presentation. *Neuropsychologia.* 2000;38(11):1531-49.

Halsband U, Krause BJ, Sipila H, Teras M, Laihinen A. PET studies on the memory processing of word pairs in bilingual Finnish-English probands. *Behav Brain Res.* 2002 Apr 15;132(1):47-57.

Haeuelsen J, Ramon C, Czapski P, Eiselt M. On the influence of volume currents and extended sources on neuromagnetic fields: a simulation study. *Ann Biomed. Eng.* 1995 Nov-Dec;23(6):728-39.

Haueisen J, Bottner A, Funke M, Brauer H, Nowak H. Effect of boundary element discretization on forward calculation and the inverse problem in electroencephalography and magnetoencephalography. *Biomed. Tech (Berl)*. 1997 Sep;42(9):240-8.

Hebb DO,. *The organization of Behaviour. A Neuropsychological Theory*. New York: Wiley 1949.

Heiss WD, Karbe H, Weber-Luxenburger G, Herholz K, Kessler J, Pietrzyk U, Pawlik G. Speech-induced cerebral metabolic activation reflects recovery from aphasia. *J Neurol Sci*. 1997 Feb 12;145(2):213-7.

Henkel CK. *The Auditory System, aus Fundamental Neuroscience*, Haines DE, 1998

Herholz K, Thiel A, Wienhard K, Pietrzyk U, von Stockhausen HM, Karbe H, Kessler J, Bruckbauer T, Halber M, Heiss WD. Individual functional anatomy of verb generation. *Neuroimage*. 1996 Jun;3(3 Pt 1):185-94.

Hernandez AE, Martinez A, Kohnert K. In search of the language switch: An fMRI study of picture naming in Spanish-English bilinguals. *Brain Lang*. 2001 Jul;73(3):421-31.

Hinke RM, Hu X, Stillman AE, Kim SG, Merkle H, Salmi R, Ugurbil K. Functional magnetic resonance imaging of Broca's area during internal speech. *Neuroreport*. 1993 Jun;4(6):675-8.

Hinton G, 1991. *Computersimulation eines Hirnschadens Spektrum der Wissenschaft*, 12 1993

Holcomb PJ, Neville H. Auditory and visual semantic priming in lexical decision: A comparison using event-related brain-potentials. *Language and cognitive Processes*, 5 1990, 281-312.

Huonker R, Nowak H, Rzanny R, Rieke K. Combined 3D neuromagnetic source imaging and MRI-scans. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl.* 1996;47:439-47.

Hynd GW, Teeter A, Stewart J. Acculturation and the lateralization of speech in the bilingual Native American. *Int J Neurosci.* 1980;11(1):1-7.

Illes J, Francis WS, Desmond JE, Gabrieli JD, Glover GH, Poldrack R, Lee CJ, Wagner AD. Convergent cortical representation of semantic processing in bilinguals. *Brain Lang.* 1999 Dec;70(3):347-63.

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 Jan;21(1):60-99.

Kandel E, Schwartz J. aus: *Neurowissenschaften 1998*, S 648-665, Jessell TM (Hrsg.).

Kim KH, Relkin NR, Lee KM, Hirsch J. Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature.* 1997 Jul 10;388(6638):171-4.

Klein D, Zatorre RJ, Milner B, Meyer E, Evans AC. Left putaminal activation when speaking a second language: evidence from PET. *Neuroreport.* 1994 Nov 21;5(17):2295-7.

Kluender R, Kutas M. Binding the gap: Evidence from ERP's on the processing of unbounded dependencies. *Journal of cognitive Neuroscience* 1993 2, 196-214.

Knecht S, Deppe M, Dräger B, Bobe L, Lohmann H, Ringelstein E, Henningsen H. Language lateralization in healthy right-handers. *Brain.* 2000 Jan;123 (Pt 1):74-81.

Knecht S. Does language lateralization depend on the hippocampus? *Brain*. 2004 Jun;127(Pt 6):1217-8.

Kotz SA, Frisch S, von Cramon DY, Friederici AD. Syntactic language processing: ERP lesion data on the role of the basal ganglia. *J Int Neuropsychol Soc*. 2003 Nov;9(7):1053-60.

Krashen S, Long M, Scarella R. Age, rate and eventually attainment in second language acquisition. In S. Krashen (Eds.) *Child-adult differences in second language acquisition*. Rowley MA: Newbury House 1982.

Kutas M, Hillyard SA. Event-related brain potentials to grammatical errors and semantic anomalies. *Memory and Cognition*. 1983 Sep;11(5):539-50.

LeMay M. Morphological cerebral asymmetries of modern man, fossil man and nonhuman primate. *Ann N Y Acad Sci*. 1976;280:349-66.

Liu LC, Ioannides AA, Muller-Gartner HW. Bi-hemispheric study of single trial MEG signals of the human auditory cortex. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1998 Jan;106(1):64-78.

Loveless N, Levanen S, Jousmaki V, Sams M, Hari R. Temporal integration in auditory sensory memory: neuromagnetic evidence. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1996 May;100(3):220-8.

Luke KK, Liu HL, Wai YY, Wan YL, Tan LH. Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension. *Hum Brain Mapp*. 2002 Jul;16(3):133-45.

Mäkelä JP, Ahonen A, Hämäläinen M, Ilmoniemi R. Functional differences between auditory cortices of the two hemispheres revealed by whole-head neuromagnetic recordings. *Human Brain Mapping* 1993 1:48-56.

Marinkovic K. Spatiotemporal dynamics of word processing in the human cortex. *Neuroscientist*. 2004 Apr;10(2):142-52.

Marslen-Wilson J. Access and integration: Protecting sound onto meaning. In: Marslen-Wilson J. (Ed) *Lexical representation and Process*, MAS MIT Press, 1, 3-24 1987

McGuire PK, Silbersweig DA, Frith CD. Functional neuroanatomy of verbal self-monitoring. *Brain*. 1996 Jun;119 (Pt 3):907-17.

Mesulam MM. Neurocognitive networks and selectively distributed processing. *Rev Neurol (Paris)* 1994 Aug-Sep;150(8-9):564-9.

Meyer M, Friederici AD, von Cramon DY. Neurocognition of auditory sentence comprehension: event related fMRI reveals sensitivity to syntactic violations and task demands. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2000 Jan;9(1):19-33.

Münte TF, Heinze HJ, Prevedel H. Ereigniskorrelierte Hirnpotentiale reflektieren semantische und syntaktische Fehler bei Sprachverarbeitung EEG und EMG verwandte Gebiete, 21,1990, 75-81.

Müller HM, Kutas M. What's in a name? Electrophysiological differences between spoken nouns, proper names and one's own name. *Neuroreport*. 1996 Dec 20;8(1):221-5.

Musiek FE. Neuroanatomy, neurophysiology, and central auditory assessment. Part III: Corpus callosum and efferent pathways. *Ear Hear*. 1986 Dec;7(6):349-58.

Musso M, Weiller C, Kiebel S, Muller SP, Bulau P, Rijntjes M. Training-induced brain plasticity in aphasia. *Brain*. 1999 Sep;122 (Pt 9):1781-90.

Musso M, Moro A, Glauche V, Rijntjes M, Reichenbach J, Buchel C, Weiller C. Broca's area and the language instinct., *Nat Neurosci*. 2003 Jul;6(7):774-81.

Neville HJ, Nicol J, Brass A. Syntactically based sentence processing classes: Evidence from event-related brain potentials. *J. of Cognitive Neuroscience* 3,1991: 155-170.

Numminen J, Salmelin R, Hari R. Subject's own speech reduces reactivity of the human auditory cortex. *Neurosci Lett.* 1999 Apr 16;265(2):119-22.

Nuwer MR. Electroencephalograms and evoked potentials. Monitoring cerebral function in the neurosurgical intensive care unit. *Neurosurg Clin N Am.* 1994 Oct; 5(4): 647-59.

Ojemann GA, Whitaker HA. The bilingual brain. *Arch Neurol.* 1978 Jul;35(7):409-12.

Opitz B, Friederici AD. Interactions of the hippocampal system and the prefrontal cortex in learning language-like rules. *Neuroimage.* 2003 Aug;19(4):1730-7.

Osterhout L, Holcomb PJ, Swinney DA. Brain potentials elicited by garden-path sentences: evidence of the application of verb information during parsing. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 1994 Jul;20(4):786-803.

Orrison WW jr., Lewine JD. Magnetencephalography and Magnetic Source Imaging. Chapter 9, *Functional Brain Imaging*, 1997. S. 369-415

Papanicolaou AC. An introduction to magnetoencephalography with some applications. *Brain Cogn.* 1995 Apr;27(3):331-52.

Papanicolaou AC, Castillo E, Breier JI, Davis RN, Simos PG, Diehl RL. Differential brain activation patterns during perception of voice and tone onset time series: a MEG study. *Neuroimage.* 2003 Feb;18(2):448-59.

Paradis M. Bilingualism and aphasia. 1979 In Whitaker H, & Whitaker A, (Eds.), *Studies in Neurolinguistics* New York: Academic Press. Vol. 3, p. 65.

Perani D, Paulesu E, Galles NS, Dupoux E, Dehaene S, Bettinardi V, Cappa SF, Fazio F, Mehler J. The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language. *Brain*. 1998 Oct;121 (Pt 10):1841-52.

Pesola K, Tenner U, Nenonen J, Endt P, Brauer H, Leder U, Katila T. Multichannel magnetocardiographic measurements with a physical thorax phantom. *Med. Biol Eng Comput*. 1999 Jan;37(1):2-7.

Petersen SE, Fiez JA. The processing of single words studied with positron emission tomography. *Annu Rev Neurosci*. 1993;16:509-30.

Petsche H, Etlinger SC, Filz O. Brain electrical mechanisms of bilingual speech management: an initial investigation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1993 Jun;86(6):385-94.

Pihko E, Leppasaari T, Leppanen P, Richardson U, Lyytinen H. Auditory event-related potentials (ERP) reflect temporal changes in speech stimuli. *Neuroreport*. 1997 Mar 3;8(4):911-4.

Pillai JJ, Araque JM, Allison JD, Sethuraman S, Loring DW, Thiruvaiyaru D, Ison CB, Balan A, Lavin T. Functional MRI study of semantic and phonological language processing in bilingual Subjects: preliminary findings. *Neuroimage*. 2003 Jul;19(3):565-76.

Price CJ. The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *J Anat*. 2000 Oct;197 Pt 3:335-59.

Proverbio AM, Cok B, Zani A. Electrophysiological measures of language processing in bilinguals. *J Cogn Neurosci*. 2002 Oct 1;14(7):994-1017.

Pulvermüller F, Lutzenberger W, Preissl H, Birbaumer N. Spectral responses in the gamma-band: physiological signs of higher cognitive processes? *Neuroreport*. 1995 Oct 23;6(15):2059-64.

Pulvermüller F, Mohr B. The concept of transcortical cell assemblies: a key to the understanding of cortical lateralization and interhemispheric interaction. *Neurosci Biobehav Rev.* 1996 Winter;20 4:557-66.

Pulvermüller F, Shtyrov Y, Ilmoniemi R. Spatiotemporal dynamics of neural language processing: an MEG study using minimum-norm current estimates. *Neuroimage.* 2003 Oct;20(2):1020-5.

Rihs F, Sturzenegger M, Gutbrod K, Schroth G, Mattle HP. Determination of language dominance: Wada test confirms functional transcranial Doppler sonography. *Neurology.* 1999 May 12;52(8):1591-6.

Rijntjes M, Weiller C. Recovery of motor and language abilities after stroke: the contribution of functional imaging. *Prog Neurobiol.* 2002 Feb;66(2):109-22.

Rose DF; Ducla-Soares E. Comparison of EEG and MEG in *Advances in Neurology*. Vol. 54 in *Magnetencephalography* Susum Sato. (Edit) Raven press New York, 1990.

Rossell SL, Price CJ, Nobre AC. The anatomy and time course of semantic priming investigated by fMRI and ERP`s. *Neuropsychologia.* 2003;41(5):550-64.

Saur D, Lange R, Baumgaertner R, Musso MC, Rijntjes M, Weiller C. Early activation and time course of recovery in aphasia: a longitudinal f-MRI study. 10 annual meeting of the Organisation for Human Brain Mapping, Budapest/Ungarn, June 12.17, 2004-07-17.

Shtyrov Y, Kujala T, Palva S, Ilmoniemi RJ, Naatanen R. Discrimination of speech and of complex nonspeech sounds of different temporal structure in the left and right cerebral hemispheres. *Neuroimage.* 2000 Dec;12(6):657-63.

Silverberg R, Bentin S, Gaziel T, Obler LK, Albert ML. Shift of visual field preference for English words in native Hebrew speakers. *Brain Lang.* 1979 Sep;8(2):184-90.

Simos PG, Breier JI, Zouridakis G, Papanicolaou AC. Identification of language-specific brain activity using magnetoencephalography. *J Clin Exp Neuropsychol*. 1998 Oct;20(5):706-22.

Sinai A, Pratt H. Electrophysiological evidence for priming in response to words and pseudowords in first and second language. *Brain Lang*. 2002 Feb;80(2):240-52.

Smith A. Speech and other functions after left (dominant) hemispherectomy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1966 Oct;29(5):467-71.

Suzuki K, Okuda J, Nakasato N, Kanno A, Hatanaka K, Yamadori A, Fujii T, Yoshimoto T. Auditory evoked magnetic fields in patients with right hemisphere language dominance. *Neuroreport*. 1997 Oct 20;8(15):3363-6.

Wada J, Rasmussen T. Intracarotid injection of sodium amytal for lateralization of cerebral speech dominance: Experimental and clinical observations. *J. Neurosurg* 1960 17: 266-282.

Wallesch C.W. Medizinische Grundlagen bei erworbenen zentralen Kommunikationsstörungen. *Handbuch der Sprachtherapie Band 6, Zentrale Sprach- und Sprechstörungen* (1991).

Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J, Cappa SF, Villringer A, Perani D. Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron*. 2003 Jan 9;37(1):159-70.

Weiller C, Chollet F, Friston KJ, Wise RJ, Frackowiak RS. Functional reorganization of the brain in recovery from striatocapsular infarction in man. *Ann Neurol*. 1992 May;31(5):463-72.

Weiller C, Isensee C, Rijntjes M, Huber W, Muller S, Bier D, Dutschka K, Woods RP, Noth J, Diener HC. Recovery from Wernicke's aphasia: a positron emission tomographic study. *Ann Neurol*. 1995 Jun;37(6):723-32.

Weiller C. Imaging recovery from stroke. *Exp Brain Res*. 1998 Nov;123(1-2):13-7.

Weiss S, Rappelsberger P. EEG coherence within the 13-18 Hz band as a correlate of a distinct lexical organisation of concrete and abstract nouns in humans. *Neurosci Lett*. 1996 May 3;209(1):17-20.

Weiss S, Mueller HM. The contribution of EEG coherence to the investigation of language. *Brain Lang*. 2003 May;85(2):325-43.

Wernicke C. The symptom-complex of aphasia. In: Church A, trans-ed *Diseases of the nervous system*. East Norwalk, CT: Application and Language, 1908: 265-324.

Williamson SJ; Kaufmann L. Analysis of neuromagnetic Signals. In: A.S. Gevins and A. Remond (Eds.): *Methods of Analysis of Brain and Magnetic Signals, EEG Handbook*(revised series, Vol. 1) Elsevier Science Publishers BV 1987, 405-448.

Xue G, Dong Q, Jin Z, Zhang L, Wang Y. An fMRI study with semantic access in low proficiency second language learners. *Neuroreport*. 2004 Apr 9;15(5):791-6.

Yoshiura T, Ueno S, Iramina K, Masuda K. Source localization of middle latency auditory evoked magnetic fields. *Brain Res*. 1995 Dec 12;703(1-2):139-44.

Zatorre RJ. On the representation of multiple languages in the brain: old problems and new directions. *Brain Lang*. 1989 Jan;36(1):127-47.

Zouridakis G, Simos PG, Breier JI, Papanicolaou AC. Functional hemispheric asymmetry assessment in a visual language task using MEG, *Brain Topography*, 1998 Vol. 11, No.1.

9 Anhang

9.1 Danksagung

Ausdrücklichen Dank meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. med. C. Weiller, für die Gesamtbetreuung des Projektes.

Herzlichen Dank auch an Frau Dr. med. Cristina Musso für ihre Hilfe bei der Erstellung der Dissertation, ihr stets offenes Ohr für Fragen und Ihre Lösungsvorschläge.

Besonders danke ich den Mitarbeitern des Biomagnetischen Zentrums in Jena für ihre technische Beratung, ihre Vermittlung von Wissen und ihre Hilfsbereitschaft, ohne welche diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Hierbei möchte ich explizit Herrn Dr. Jens Haueisen für seine Geduld und konstruktive Kritik meinen Dank aussprechen.

Meinem Freund Rüdiger Lange danke ich von Herzen für seine Anregungen und seine Hilfe beim Bewältigen von technischen und didaktischen Problemen.

Bettina Weber und vor allen Franziska Fuhrer danke ich für ihre mentale Unterstützung und Motivation, sowie für ihre Korrekturvorschläge.

9.2 Lebenslauf

Persönliche Angaben: Christof Zöllner
Neustadt 20
CH - 8200 Schaffhausen
geboren: 22.03.1973 in Arnsberg, Deutschland

Schulbildung:

1979 – 1983	Grundschule in Sundern-Stockum
1983 – 1989	Städtische Realschule in Sundern
1989 – 1992	Städtisches Gymnasiums in Sundern

Hochschulbildung:

10/1994	Beginn des Studiums der Humanmedizin an der Friedrich Schiller Universität in Jena
08/1996	Ärztliche Vorprüfung (Physikum)
08/1997	1. Abschnitt der ärztlichen Prüfung
03/2000	2. Abschnitt der ärztlichen Prüfung
04/2000 – 03/2001	Praktisches Jahr
06/2001	3. Abschnitt der ärztlichen Prüfung

Abstracts:

Temporal processing of language: A MEG study (poster-presentation)
5´th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain
22.-26.06.1999 Düsseldorf / Deutschland

Temporal processing of native and non-native language: A MEG study
(poster-presentation) 4´th International Hans Berger Congress
September 2000 Jena / Deutschland

Berufliche Laufbahn:

08/2001 – 05/2003	Assistenzarzt (AiP) chirurgische Abteilung Regionalspital Emmental, Schweiz
seit 07/2003	Assistenzarzt chirurgische Abteilung Kantonsspital Schaffhausen, Schweiz

9.3 Eidesstattliche Versicherungen

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher keinem Fachvertreter einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt, oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.